



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Entwicklung eines Prüf- und Messstandes für die Kalibrierung optischer Systeme

Bachelorarbeit (B.Sc.)

von

Janek Möller

aus Fürstentfeldbruck

Hochschule München

Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik

Studiengang Physikalische Technik (B.Sc.)

in Kooperation mit

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Materialphysik im Weltraum

Arbeitsgruppe Komplexe Plasmen

Referent: Prof. Dr. Fritz Wondrazek

Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Johannes Prell, DLR

Tag der Einreichung: 28.03.2017

München 2017

Abstract

Die komplexe Plasmaforschung befasst sich mit der Untersuchung von Plasmakristallen sowohl in der Schwerelosigkeit, als auch komplementär dazu im Labor unter Schwerkraftbedingungen. Dabei werden Teilchen über optische Systeme detektiert und deren Verhalten analysiert. Um genaue und repräsentative Ergebnisse zu erhalten, müssen die Kamera- und Laserstrahlssysteme kalibriert und optomechanisch justiert werden. Zu diesem Zweck wird ein Prüf- und Messstand zur Kalibrierung optischer Komponenten und Systeme entwickelt und aufgebaut. Die Arbeit befasst sich mit verschiedenen, bei optischen Abbildungen auftretenden, Abbildungsfehlern und schafft durch den Kalibrierstand Möglichkeiten, diese zu charakterisieren. Der Kalibrierstand wird anhand der Anforderungen im Projekt EKoPlasma des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entworfen und im hauseigenen Labor aufgebaut. Um den stetig wechselnden Anforderungen des Prüfstandes gerecht zu werden, wird der Aufbau im Folgenden durch eine modulare Bauweise realisiert. Abschließend werden, zur Validierung des Prüfstandes, zwei Kamerasysteme auf deren Abbildungseigenschaften untersucht und verschiedene Abbildungsfehler charakterisiert.

abstract (english)

Complex plasma research is concerned with the investigation of plasma crystals under micro-gravity conditions as well as complementarily on ground. The particles are detected by optical systems to analyze their motion. In order to obtain accurate and representative results, the camera and laser beam systems must be calibrated. For this purpose, a test environment for the calibration of optical components and systems is developed and constructed. The work deals with different aberrations occurring in optical images and gives a possibility to characterize them through the calibration-setup. The calibration environment is designed according to the requirements of the EKoPlasma project of the German Aerospace Center (DLR) and is built in their laboratories. In order to deal with the constantly changing requirements of the calibration-setup, the structure will be realized by a modular design. Finally, for the validation of the calibration-setup, two camera systems are examined for their imaging properties and get analyzed on different aberrations.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abbildungsverzeichnis | vi |
| Tabellenverzeichnis | vii |
| Notation der verwendeten Variablen | ix |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 Optische Systeme - Definition und Vorzeichenkonvention | 5 |
| 2.2 Abbildungsfehler | 5 |
| 2.3 Kamerakalibrierung | 7 |
| 3 Anforderungen | 9 |
| 4 Konzept | 11 |
| 4.1 Positionierung | 11 |
| 4.2 Umgebung und Zugriff auf das Experiment | 12 |
| 4.3 Target und Beleuchtung | 13 |
| 5 Konstruktion und Aufbau des Kalibrierstandes | 18 |
| 6 Technische Validierung | 24 |
| 6.1 Versuch: Field of View und Abbildungsmaßstab | 25 |
| 6.2 Versuch: Bildfeldwölbung | 29 |
| 6.3 Versuch: Verzeichnung | 31 |
| 7 Diskussion und Ausblick | 39 |
| Literaturverzeichnis | 41 |
| A Versuchsprotokoll Bildfeldwölbung | 43 |
| B Technische Zeichnungen und Datenblätter | 44 |
| C Messdaten der Versuche, weitere Datenblätter und Aufbau in CATIA | 67 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Zyflex Plasma-Kammer | 2 |
| 1.2 | EKoPlasma Aufbau konzipiert für Parabelflug | 2 |
| 1.3 | Plasmakristall aus Parabelflug-Kampagne 2015 | 3 |
| 2.1 | Vorzeichenkonvention optischer Systeme | 5 |
| 4.1 | Positionsregelung mit Target und Kamera samt abbildendem System | 12 |
| 4.2 | Kastenbau der Firma ThorLabs | 13 |
| 4.3 | Beleuchtungsarten Target | 14 |
| 4.4 | Targetmuster | 17 |
| 5.1 | Zusammensetzung der Targethalterung | 19 |
| 5.2 | Befestigung der Targethalterung mit verstellbaren Winkel | 19 |
| 5.3 | Befestigung der Profilstange auf dem Schlitten | 20 |
| 5.5 | Querschnitt Profilstange | 20 |
| 5.4 | Fertiger Grundaufbau des Kalibrierstandes mit allen verstellbaren Achsen | 21 |
| 5.6 | Kabeldurchführung an der Rückwand des Kalibrierstandes | 22 |
| 5.7 | Fertig aufgebauter Kalibrierstand | 23 |
| 6.1 | Im Versuch verwendete Kameras | 24 |
| 6.2 | Aufbau Objektiv der Kamera Ximea MQ042MG-CM | 25 |
| 6.3 | FoV Kamera Ximea MQ013MG-ON | 26 |
| 6.4 | FoV Kamera Ximea MQ042MG-CM | 28 |
| 6.5 | Prinzip Auswertung Bildfeldwölbung | 30 |
| 6.6 | Betrachtung der Ergebnisunsicherheit des Wölbungsradius der Petzvalfläche | 31 |
| 6.7 | Verzeichnungstestbild Kamera Ximea MQ013MG-ON | 32 |
| 6.8 | Plot der Verzeichnung von Kamera Ximea MQ013MG-ON | 34 |
| 6.9 | Verzeichnungstestbild Kamera Ximea MQ042MG-CM | 36 |
| 6.10 | Plot der Verzeichnung von Kamera Ximea MQ042MG-CM | 37 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Überblick über verschiedene Beleuchtungsarten und deren Vor- und Nachteile . . | 15 |
| 6.1 | Bildfeldwölbung der Kamera Ximea MQ042MG-CM | 30 |
| 6.2 | Verzeichnung der Kamera Ximea MQ013MG-ON | 33 |
| 6.3 | Verzeichnung der Kamera Ximea MQ042MG-CM | 35 |

Notation der verwendeten Variablen

| Variable | Bedeutung |
|--------------------------------|---|
| a | Objektweite |
| a' | Bildweite |
| $\alpha/2$ | Halber, objektseitiger Öffnungswinkel |
| β | Abbildungsmaßstab |
| F | Objektseitiger Brennpunkt |
| f | Objektseitige Brennweite |
| F' | Bildseitiger Brennpunkt |
| f' | Bildseitige Brennweite |
| FoV | Field of View |
| H | Objektseitige Hauptebene |
| H' | Bildseitige Hauptebene |
| I | Intensität |
| M | Modulation (Streifen-Kontrast) |
| n | Brechungsindex |
| R | Ortsfrequenz der MTF |
| r_p | Krümmungsradius der Petzvalfläche |
| s_x | Mess- und Ergebnisunsicherheit der Variable x |
| $T(R)$ | Modulationsübertragungsfunktion (MTF) |
| x_m, y_m | x- und y-Koordinaten des Kreismittelpunktes |
| $y_{Sensor} \times z_{Sensor}$ | Sensorgroße der Kamera |
| y | Objektgröße |
| y' | Bildgröße |

1 Einleitung

Komplexe Plasmen sind Plasmen, welche neben neutralem Gas auch Partikel der Größe von einigen Mikrometern enthalten [1]. Die Partikel laden sich aufgrund von Wechselwirkungen mit den Elektronen und Ionen des Plasmas stark auf und beeinflussen sich durch elektrostatische Kräfte gegenseitig. Während Plasma laut allgemeiner Lehrmeinung als ungeordneteste Form der Materie gilt, können komplexe Plasmen hingegen abhängig von Partikeldichte, Gasdruck und Temperatur, gasförmige, flüssige oder kristalline Strukturen bilden [2][3][4]. In diesen Strukturen laufen Vorgänge, aufgrund der hohen Partikeldichte, relativ langsam ab und sind somit gut beobachtbar. Damit ergibt sich ein ideales Modellsystem zur Untersuchung von Vorgängen in Materie bei denen die Staubteilchen Atome oder Moleküle repräsentieren [5]. Schwerkraft beeinflusst die Partikel, sodass nur zweidimensionale Strukturen mit wenigen Schichten gebildet werden können. Unter Schwerelosigkeit hingegen ist es möglich große, homogene, dreidimensionale Strukturen zu erzeugen [1]. Die Arbeitsgruppe „Komplexe Plasmen“ vom Institut für Materialphysik im Weltraum des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt Versuchsaufbauten für den Einsatz auf der internationalen Raumstation ISS, in denen dieser Zustand gezielt beeinflusst und untersucht werden kann.

Im aktuellem Forschungsprojekt EKoPlasma befasst sich die Forschungsgruppe mit der Weiterentwicklung der „Zyflex“ Plasma-Kammer (**z**ylindrische Plasmakammer mit **f**lexiblem Plasmavolumen), um homogene, schwach begrenzte Plasmen bei niedrigen Neutralgasdrücken zu erzeugen [5] (siehe Abbildung 1.1). Wissenschaftliche Zielsetzungen liegen unter anderem in den Bereichen Phasenübergänge, dynamisches Verhalten von Flüssigkeiten auf atomarem Level, Phasenseparation oder anisotrope Wechselwirkungen. Das Plasma wird durch zwei gegenüberliegende Elektroden mit hochfrequenter Wechselspannung erzeugt. Üblicherweise wird ein Edelgas, wie Argon oder Neon, bei Gasdrücken von unter 1 Pa bis zu 133 Pa verwendet. Daraufhin werden mikrometergroße, sphärische Partikel aus Melamin-Formaldehyd in das Plasma eingestreut. Die Teilchen laden sich unmittelbar auf und ein komplexes Plasma entsteht. Mit Hilfe eines aufgefächerten Lasers wird ein zweidimensionaler Schnitt durch die Teilchenwolke beleuchtet. Das Licht wird an den Partikeln gestreut, wodurch diese in Kamerasystemen sichtbar werden. Dadurch kann die Teilchenbewegung in Echtzeit erfasst und analysiert werden [1][5]. Derzeit existieren drei identische Plasmakammern, welche als Prototypen für den späteren Aufbau auf der ISS dienen. Während Parabelflug-Kampagnen ist es möglich, bereits erste wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen und die eingesetzte Technologie zu testen. Abbildung 1.2 zeigt das Versuchsssetup der Parabelflug-Kampagne von 2015 mit den wichtigsten Komponenten. In Abbildung 1.3 ist ein Teilchenbild eines Plasmakristalls zu sehen, welches während dieser Kampagne aufgenommen wurde.

Optische Systeme sind ein wichtiger Bestandteil der Sensorik-, Mess- und Versuchsaufbauten in EKoPlasma. Mit mehreren Kameras werden sowohl die Teilchen, das Plasma als auch die Umgebung des Setups beobachtet. Die Partikel werden mit einem Laserstrahlssystem angeleuchtet und streuen das Licht, wodurch sie sichtbar werden. Dafür wird der Laser mit verschiedenen Optiken aufgefächert, sodass, ein von der Helligkeit homogener Schnitt durch die Teilchenwolke entsteht. Vor den Kameras zur Partikeldetektion sind meist Laserfilter montiert, um störende Lichteinflüsse zu minimieren. Zur Echtzeitdiagnostik der zweidimensionalen Teilchenbewegung werden

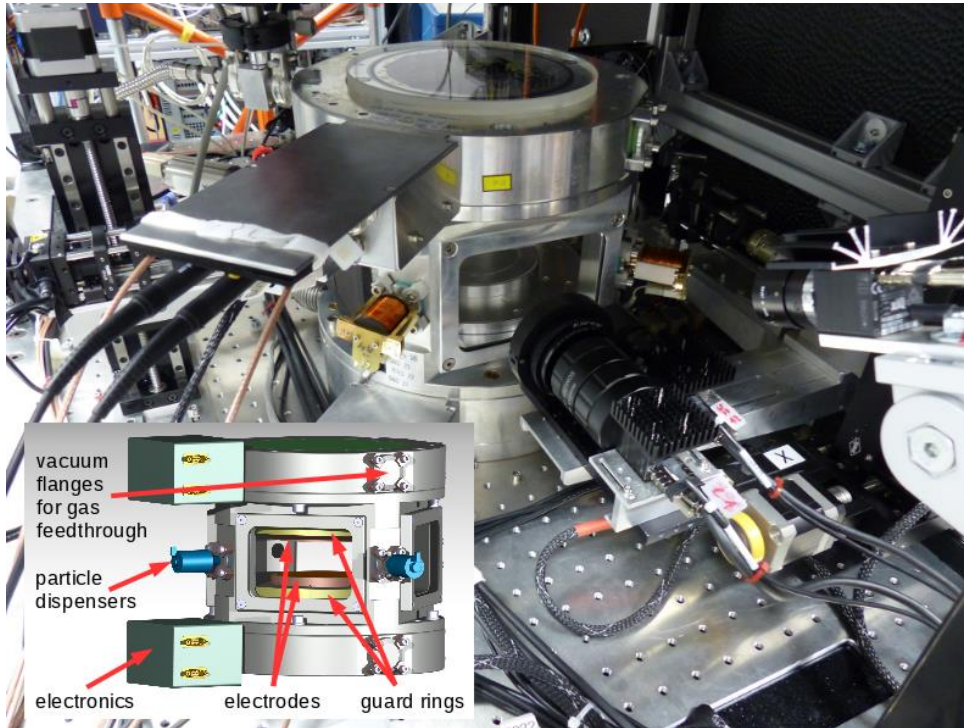


Abbildung 1.1: „Zyflex“ Plasma-Kammer. Die zylindrische Plasma-Kammer verfügt über zwei parallele Elektroden, welche das Plasma erzeugen und die Teilchen beeinflussen. Umgeben sind die Elektroden von Guard Ringen, welche geerdet sind und die Teilchen in der Kammermitte halten. Elektroden und Guard Ring können in der Höhe variiert werden und somit das Plasmavolumen flexibel verändern. Außerdem verfügt die Kammer über vier große Sichtfenster für die Kameras und Laser, Anschlüsse für Vakuumpumpen, Gassystem und Druckmessgeräte sowie Partikel Dispensoren (vergleichbar mit elektro-magnetischen automatisierten Salzstreuern) zum Einstreuen der Teilchen.

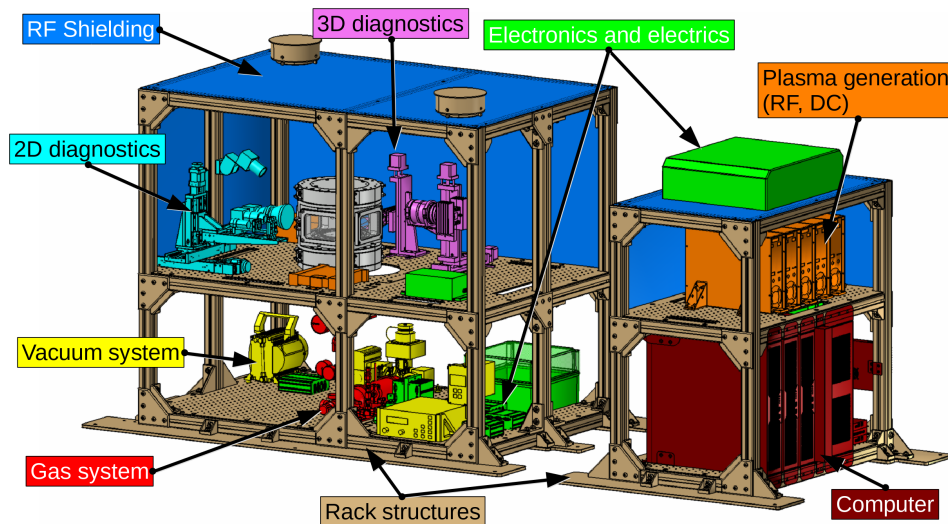


Abbildung 1.2: EKoPlasma Aufbau konzipiert für Parabelflug. Der Aufbau beinhaltet zwei Racks, welche während dem Parabelflug im Flugzeug montiert werden. Die wichtigsten Komponenten sind farbig markiert und beschriftet. Außerdem befinden sich drei Monitore an der Front des Setups, über die das Experiment gesteuert und die Kamerabilder angezeigt werden[1].

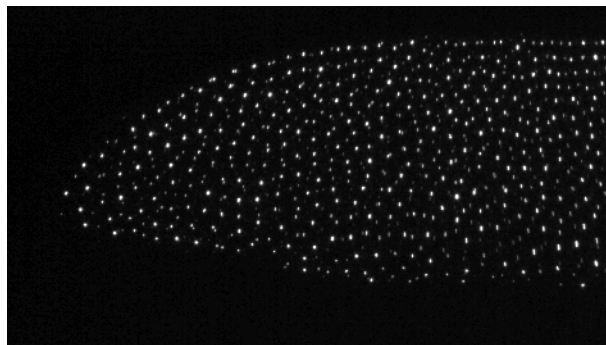


Abbildung 1.3: Plasmakristall aus Parabelflug-Kampagne 2015. Das Bild zeigt einen Plasmakristall unter Schwerelosigkeit mit einem Teilchendurchmesser von $7,17\ \mu\text{m}$. Das Bild wurde in Argon-Gas bei einem Gasdruck von 15 Pa und einer RF-Spannung von 70 V aufgenommen.

im aktuellen Setup Ximea XiQ USB 3.0 Kameras eingesetzt, welche Bilder in Schwarz-Weiß aufzeichnen und mit einer Auflösung von bis zu vier Megapixel und einer zugehörigen Bildrate von bis zu 90 fps arbeiten. Aktuell wird ein stereoskopisches Kamerasetup zur dreidimensionalen Partikeldetektion in Echtzeit entwickelt [1][5]. Um genaue und repräsentative Ergebnisse zu erhalten, müssen diese optischen Systeme kalibriert, optomechanisch justiert und aufeinander angepasst werden. Zu diesem Zweck wird ein Kalibrier- und Prüfstand für optische Komponenten und Systeme entwickelt und aufgebaut.

Der Kalibrier- und Prüfstand wird in dieser Arbeit anhand der Anforderungen im Projekt EKo-Plasma entwickelt und aufgebaut. Allerdings soll dieser auch in zukünftigen Forschungsprojekten einsatzfähig bleiben. Somit werden auch für diese Projekte erste Grundlagen geschaffen, sowie ein Augenmerk auf eine mögliche, stetige Veränderung des Prüfstandes gelegt.

Zunächst werden im **zweiten Kapitel** erste Grundlagen von optischen Abbildungen und dabei auftretende Abbildungsfehler erklärt. Dabei wird auch das Achsensystem im Prüfstand und die Vorzeichenkonvention definiert. Außerdem wird hier das grundlegende Prinzip der Kamerakalibrierung erläutert.

Die Anforderungen an den Prüfstand werden im **dritten Kapitel** festgelegt, hauptsächlich anhand der Anforderungen im Projekt EKoPlasma aber auch mit Verweis auf mögliche Erweiterungen.

Im **vierten Kapitel** werden dann in einem ersten Konzeptentwurf Möglichkeiten aufgezeigt, diese Anforderungen umzusetzen. Verschiedene Methoden werden miteinander verglichen und auf deren Realisierbarkeit untersucht.

Die Umsetzung des Konzepts erfolgt dann im **fünften Kapitel**, wo auch die genauen Details des Prüfstandes festgelegt werden. Hier wird konkret auf die einzelnen, im Prüfstand verwendeten, Bauteile und deren Zusammenspiel eingegangen. Werden Bauteile nicht käuflich erworben, wird hier außerdem deren Konstruktions- und Fertigungsmethoden beschrieben. Nach diesem Kapitel ist der Kalibrier- und Prüfstand fertig aufgebaut.

Um die Funktionsfähigkeit des Prüfstandes zu validieren, werden im **sechsten Kapitel** Versuche mit zwei verschiedenen Kamerasystemen durchgeführt. Die aufgenommenen Bilder werden dann auf die Abbildungsfehler Bildfeldwölbung und Verzeichnung untersucht und das Field of View sowie der Abbildungsmaßstab der Kamerasysteme bestimmt.

Zum Schluss werden dann im **siebten Kapitel** Schwachpunkte des Systems diskutiert und ein Augenmerk auf mögliche Erweiterungen gelegt. Außerdem werden hier Erfahrungswerte aus den Versuchen aufgegriffen und überprüft, ob die Ergebnisse den gestellten Anforderungen entsprechen.

2 Grundlagen

2.1 Optische Systeme - Definition und Vorzeichenkonvention

Ideale optische Systeme bilden alle von einem Gegenstandspunkt ausgehende Strahlen in einem Bildpunkt ab. Dabei gehen Geraden wieder in eine Gerade über und die Abbildung bleibt maßstabsgetreu [6]. Die typischen Bezeichnungen in einem optischen System wie Brennweite, Bild- und Objektweite oder Bild- und Objektgröße sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Strecken und Winkel sind gerichtete Größen. Es gilt die Vorzeichenkonvention nach DIN1335 [7].

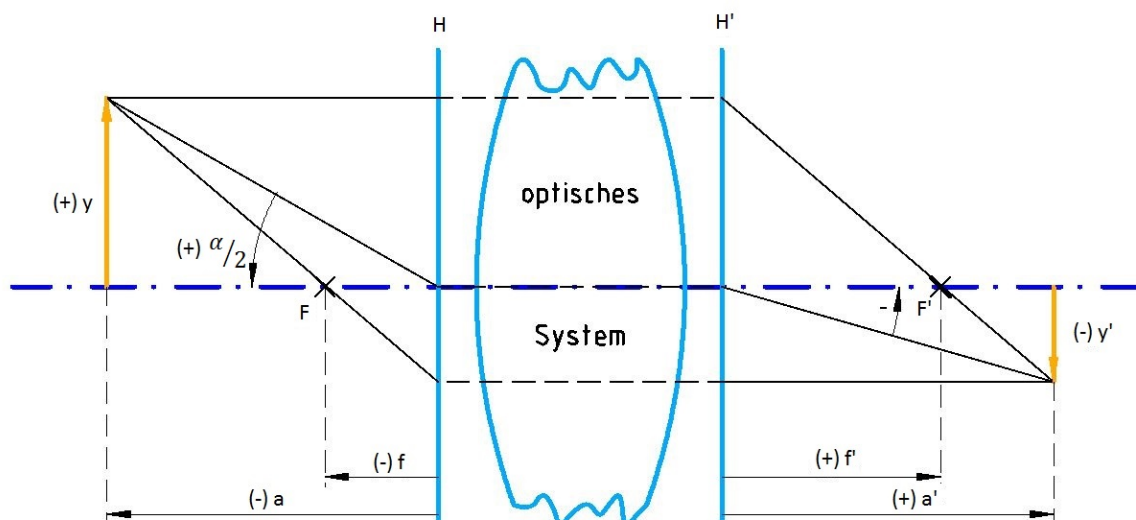


Abbildung 2.1: Vorzeichenkonvention optischer Systeme nach DIN1335 [7] mit den wichtigsten Streckenparametern und Bezeichnungen

Das Achsensystem im Kalibrierstand ist nach dem im Projekt EKoPlasma verwendeten Achsensystem ausgerichtet. Demnach verläuft die x-Achse in Lichtrichtung und definiert die optische Achse als Symmetrieachse. Die y-Achse verläuft senkrecht dazu in horizontaler Richtung. Die z-Achse vertikal.

2.2 Abbildungsfehler

Werden nicht alle von einem punktförmigen Gegenstand ausgehende Strahlen in einem einzigen Bildpunkt fokussiert, spricht man von Abbildungsfehlern. Diese bewirken eine Verbreiterung der Abbildung und somit ein verringertes Auflösungsvermögen. Bei den nachfolgend beschriebenen monochromatischen Aberrationen entstehen die Fehler nicht durch Fertigungs- oder Materialfehler sondern beruhen vielmehr darauf, dass bei der Herleitung der Brechungs- und Reflexi-

ongesetzte Näherungen für kleine Winkel an ebenen Flächen angesetzt werden [8]. Material- und Herstellungsfehler müssen aber ebenfalls im Kalibriervorgang erkannt und berücksichtigt werden. Der deutsche Mathematiker Ludwig von Seidel hat Abbildungsfehler anhand einer Reihenentwicklung untersucht und klassifiziert. Es gibt fünf Seidelsche Aberrationen für monochromatisches Licht [9]:

- **Sphärische Aberration**

Wenn Strahlen, die von einer Punktquelle auf der optischen Achse ausgehen, auf eine dünne Linse mit sphärischer Oberfläche treffen, werden Strahlen, die in größerem Winkel zur Achse verlaufen, stärker gebrochen als achsennahe Strahlen. Ein Punkt wird somit als kreisförmige Scheibe abgebildet. Der Fehler kann durch Variation der Linsenform mit einer asphärischen Fläche korrigiert werden. Auch eine Kombination mehrerer Linsen mit verschiedenen Brennweiten kann die sphärische Aberration vermindern [9].

- **Koma**

Koma ist eine außeraxiale Aberration. Schräg zur Achse einfallende Strahlenbündel besitzen, je nach Öffnungswinkel, einen unterschiedlichen Abbildungsmaßstab. Der Abbildungsmaßstab ist bei Zentralstrahlen anders als bei Randstrahlen. Ein abgebildeter Punkt nimmt somit eine kometenschweifähnliche Form an [9].

- **Astigmatismus**

Zur Beschreibung des Astigmatismus werden die Tangentialebene und Sagittalebene definiert. Die Tangentialebene (Meridionalebene) wird durch einen, nicht auf der optischen Achse liegenden, Objektpunkt und der optischen Achse beschrieben. Die Sagittalebene steht senkrecht auf der Tangentialebene. Der Hauptstrahl liegt als einziger Strahl in beiden Ebenen [9]. Beim Astigmatismus besitzt das System unterschiedliche Brennweiten in der tangentialen und sagittalen Ebene. Dies kann zum Beispiel durch plane Elemente, die nicht exakt orthogonal zur optischen Achse stehen, erzeugt werden [10]. Es entsteht eine elliptische Abbildung.

- **Bildfeldwölbung**

Bei der Bildfeldwölbung liegen die Fokuspunkte verschiedener Objektpunkte auf einer gekrümmten Fläche, die sogenannte Petzval-Fläche. Die Größe des Fokus auf dieser Fläche wird dabei nicht beeinträchtigt. Die Petzval-Summe ist ein Maß für die Bildfeldwölbung eines optischen Systems. Der reziproke Krümmungsradius r_p der Petzval-Fläche ergibt sich aus den jeweiligen Brennweiten f_i und Brechungsindizes n_i der i -ten Linse. Er ist somit unabhängig von Linsenform und Position [9].

$$\frac{1}{r_p} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i f_i'} \quad (2.1)$$

- **Verzeichnung**

Ähnlich wie bei der Bildfeldwölbung werden bei der Verzeichnung die Fokuspunkte in der Bildebene scharf abgebildet. Die Ebene ist hier nicht gekrümmt, das Bild wird dennoch geometrisch verzerrt. Bei der Verzeichnung ändert sich der Abbildungsmaßstab je nach Abstand zur optischen Achse, wodurch sich gerade Linien wölben. Je nach Wölbungsrichtung ergeben sich

beispielsweise kissen- oder tonnenförmige Verzeichnungen. Die Lage der Apertur beeinflusst die Verzeichnung, da sich der Lichtweg und somit der Abbildungsmaßstab je nach Position ändert. Ein symmetrisches Dublette, das eine Apertur in der Mitte zwischen zwei Linsen aufweist, ist frei von Verzeichnung [9].

Ist das Licht hingegen polychromatisch, tritt ein Abbildungsfehler auf, welcher von der Dispersion herrührt, also von der unterschiedlichen Brechzahl verschiedener Wellenlängen. Dieser Abbildungsfehler wird **chromatische Aberration** genannt. Kurzwelliges (blaues) Licht wird stärker gebrochen, als langwelliges (rotes) Licht. Eine geschickte Kombination von Linsen aus unterschiedlichen Materialien kann dazu beitragen, dass sich die chromatische Aberration der Einzellinsen gegenseitig aufhebt. Dadurch können die Auswirkungen weitgehend vermieden werden [8].

Alle hier beschriebenen Abbildungsfehler werden additiv überlagert. Durch Kombination verschiedener Linsen können diese Fehler minimiert werden. Alle Fehler zu minimieren ist jedoch relativ schwer, da Maßnahmen zur Verminderung eines bestimmten Fehlers im allgemeinen auch alle anderen beeinflussen.

2.3 Kamerakalibrierung

Ein Kalibrierstand dient der Beurteilung der Abbildung eines optischen Systems. Er besteht hauptsächlich aus einer zur Bildanalyse aufnehmenden Kamera, einem abbildenden optischen System und einem genau definierten Muster in der Objektebene, dem Target. Durch Vergleich der Bildebene (Kamerabild) mit der Objektebene (Target) können Abbildungsfehler erkannt und charakterisiert werden. Um die Abbildungsqualität von nur einem Bauteil, wie einem Objektiv vor der Kamera zu bestimmen, muss die Abbildungsmatrix der anderen Systeme bereits bekannt sein. Im Ergebnis können diese dann wieder heraus gerechnet werden. Durch Justage der einzelnen Bauteile kann versucht werden, die Qualität der Abbildung weiter zu verbessern. Wichtige Parameter in den hier verwendeten Systemen sind die Blendenöffnung, Linsenposition, aber auch die Ausrichtung der Kamera.

Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) ist ein Maß zur objektiven Beurteilung abbildender Systeme. Sie wird als Funktion der Ortsfrequenz R angegeben und dient der Beurteilung des Auflösungsvermögens optischer Systeme. Zur Bestimmung der MTF wird die mögliche Modulation (Kontrast) einer Abbildung für ein Streifenmuster unterschiedlicher Ortsfrequenz bestimmt.

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.2)$$

Die Modulationsübertragungsfunktion ist dann definiert als:

$$T(R) = \frac{M_{Bild}}{M_{Objekt}} \quad (2.3)$$

Streng genommen müssen die Streifenmuster einen sinusförmigen Verlauf aufweisen. Aus fertigungstechnischen Gründen werden jedoch meist Rechteckmuster verwendet. Es kann gezeigt werden [11], dass für die korrigierte MTF näherungsweise gilt:

$$MTF_{kor} = \frac{\pi}{4} MTF \quad (2.4)$$

Neben den klassischen Abbildungsfehlern gibt es weitere wichtige Eigenschaften, die in den Systemen zu bestimmen sind. Besonders der Abbildungsmaßstab [8] ist in EKoPlasma von Bedeutung. Er gibt an, wie viele Pixel des Kamerabildes wie viele Millimeter real entsprechen (Gleichung 2.5). Je genauer der Abbildungsmaßstab definiert ist, umso genauer kann die Teilchenposition und somit der Abstand der einzelnen Teilchen zueinander bestimmt werden. Die Versuchsqualität und -genauigkeit wird dadurch gesteigert.

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = \frac{f}{f-a} \quad (2.5)$$

Auch der gesamte sichtbare Bereich, das Field of View, ist in EKoPlasma von Bedeutung. Je nach Öffnungswinkel und Objektabstand variiert der sichtbare Bereich. Der Öffnungswinkel α lässt sich über geometrische Zusammenhänge ermitteln. Es gilt:

$$\alpha = 2 * \arctan\left(\frac{y}{-a}\right) = 2 * \arctan\left(\frac{0.5 * FoV}{-a}\right) \quad (2.6)$$

Mit der Schärfentiefe werden Objektpunkte beschrieben, die nicht exakt auf der Objektebene liegen. In der Abbildung werden diese Objektpunkte dann kurz vor oder hinter der Bildebene fokussiert und ergeben auf der Bildebene selbst gewisse Unschärfekreise. Die Schärfentiefe beschreibt den Bereich, in dem die Objektpunkte noch mit ausreichender Schärfe abgebildet werden. Wo die Grenzen eines akzeptablen Bildes liegen, hängt vom Betrachter und der Anwendung ab [9]. In der Zyflex-Kammer können dadurch Teilchen, welche nicht exakt auf einer Ebene liegen, trotzdem abgebildet werden. Um Tiefeninformationen zu erhalten, muss allerdings mit dreidimensionalen Kameraaufbauten gearbeitet werden. Anhand der Schärfentiefe kann dann zum Beispiel eine geeignete Laserstahlbreite gewählt werden.

3 Anforderungen

Die Anforderungen an den Prüf- und Messstand ergeben sich hauptsächlich aus den Anforderungen des Forschungsprojektes EKoPlasma. Die zu prüfenden optischen Systeme sind hierbei sehr unterschiedlich. Ziel ist es zum Beispiel, Kamerasysteme, Objektive oder Laserstrahlssysteme standardisiert kalibrieren und optomechanisch justieren zu können. Aber auch Kameramatrizen oder Systeme aus mehreren Kameras zur dreidimensionalen Partikeldetektion sollen in diesem Prüfstand berücksichtigt werden. Kamera und die abbildende Optik ergeben meist ein gemeinsames System, dessen Abbildungseigenschaften es zu bestimmen gilt. Die Dimensionen dieser optischen Systeme können dabei stark variieren. Auch die Anforderungen an das Target bzw. die Objektebene sind hier sehr unterschiedlich.

Im aktuellem Forschungsprojekt werden in das Plasma Teilchen mit einer Größe von $1\text{ }\mu\text{m}$ bis $9\text{ }\mu\text{m}$ eingestreut. Diese nehmen dann einen Abstand von etwa dem 10 bis 100 fachen Teilchendurchmesser ein. Um eine ausreichende Positionsgenauigkeit der Teilchen zu erhalten, ist eine Auflösung von kleiner gleich $12\text{ }\mu\text{m}$ notwendig. Um diese Genauigkeit zu erreichen, ist bei allen Bauteilen auf eine möglichst spielfreie Montage, sowie auf reproduzierbare Verstellmöglichkeiten mit möglichst wenig Blindgang zu achten.

Aufbau und Umgebung

In diesem Prüfstand sollen die optischen Systeme soweit kalibriert und justiert werden, dass sie ohne erneuter Justage in das Versuchsssetup von EKoPlasma integriert werden können. Da verschiedene Kamerasysteme zum Einsatz kommen, ist es wichtig, dass diese schnell in den Messstand integriert werden können. Die Eigenschaften der einzelnen Systeme sind hier sehr unterschiedlich. Gerade der Abstand zum Fokuspunkt kann stark variieren. In Richtung der optischen Achse (x-Richtung) ist somit eine große Abstandsvariation von mindestens $0,6\text{ m}$ notwendig. In Richtung der y- und z-Achse kann der Verstellweg kleiner ausfallen. Es reicht die Position auf diesen Achsen um etwa $0,1\text{ m}$ variieren zu können. Auf allen drei Achsen muss die Kameraposition jedoch relativ zur Bildebene im Mikrometerbereich verifizierbar und protokollierbar geregelt werden können.

In EKoPlasma werden die Teilchen mit einem Laser beleuchtet, streuen dieses Licht und sind somit in den Kamerasystemen sichtbar. Sie dienen quasi als Lichtquelle, während der Rest der Kammer dunkel ist. Auch das Target im Prüfstand sollte aktiv beleuchtet sein oder sogar selbst leuchten können. Dabei ist darauf zu achten, dass in der gesamten Objektebene eine möglichst homogene Beleuchtung erreicht wird. Schwankungen in der Helligkeit oder Flackern des Lichtes sind zu vermeiden. Zur optimalen Bildausleuchtung ist es erforderlich, die Helligkeit der Targetbeleuchtung anzupassen, um somit verschiedene Parameter im optischen System, wie die Blendenöffnung, Sensorempfindlichkeit oder Belichtungszeit, auszugleichen. Die Targeteigenschaften selber ergeben sich aus den zu bestimmenden Abbildungsfehlern (vgl. Abschnitt „Erkennbare Abbildungsfehler“, Seite 10).

Die Bilder werden digitalisiert aufgenommen und am PC angezeigt. Hierüber erfolgt dann auch die Beurteilung des Bildes, sowie die Versuchsauswertung. Eine bestimmte Software zur Bildanalyse ist nicht vorgegeben. Geeignete Programme können selbst gewählt werden, wobei das DLR bereits einige Programme zur Bildanalyse entwickelt hat. Auch auf Open-Source verfügbare Software wird derzeit immer wieder zurück gegriffen.

Wie auch die Partikel im Projekt EKoPlasma ist das Target im Prüfstand selbstleuchtend. Umgebungslicht kann hier zu ungewollten Lichtreflexionen führen und sollte somit vermieden werden. Das Target stellt die einzige Lichtquelle in der ansonsten abgedunkelten Versuchsumgebung dar. Ebenso ist es erforderlich, dass sich das System in einer, in gewissermaßen staubfreien Umgebung befindet (Reinraum Bedingungen sind nicht erforderlich). Dies dient dazu, dass auch offene optische Systeme aus einzelnen Linsen nicht mit der Zeit verunreinigt werden und sich deren Abbildungsqualität verschlechtert.

Die Anforderungen an den Kalibrierstand können sich je nach zu prüfendem System stetig ändern. Damit dieser auch in nachfolgenden Forschungsprojekten einsatzfähig bleibt, ist es wichtig, dass Erweiterungen jederzeit in den Aufbau integriert werden können. So könnte beispielsweise neben der klassischen optischen Achse mit Objekt- und Bildebene und einem abbildendem System eine weitere parallele Achse zur Laserkalibrierung integriert werden. Auch für die Kalibrierung von aktuell entwickelten Techniken, wie der dreidimensionalen Partikeldetektion, sollten nötige Bauteile jederzeit nachträglich in den bestehenden Kalibrierstand integriert werden können. Ein möglicher Aspekt wäre eine schiefe Objektebene um Tiefeninformationen zu erhalten.

Erkennbare Abbildungsfehler

Um in EKoPlasma die Partikelposition exakt bestimmen zu können, ist vor allem der Abbildungsmaßstab von großer Bedeutung. Abbildungsfehler, welche diesen beeinflussen und somit das Bild verzerren sind hierbei von besonderem Interesse. Hierzu gehören Koma und Verzeichnung. Der Abbildungsmaßstab kann sich in Abhängigkeit von der Bildposition ändern, was Einfluss auf die Berechnung der Teilchenposition hat. Auch die Bildfeldwölbung sollte während dem Kalibriervorgang berücksichtigt werden. Abbildungsfehler, welche die Bildschärfe beeinflussen, wie sphärische Aberration und Astigmatismus, sind während der Justage zu minimieren. Sie müssen jedoch nicht genauer charakterisierbar sein.

Da bei der Partikeldetektion mit monochromatischem Laserlicht gearbeitet wird, ist die chromatische Aberration nicht weiter von Bedeutung. Vor den Kamerasystemen sind üblicherweise Laserfilter integriert und die Kameras nehmen Bilder nur in Schwarz-Weiß auf.

Die Schärfentiefe und das Field-of-View sind ebenfalls wichtige Eigenschaften, welche bei Bedarf zu bestimmen sind. Die daraus resultierenden Anforderungen an das Target sind sehr unterschiedlich. Mit verschiedenen Targetmustern können jeweils unterschiedliche Abbildungseigenschaften bestimmt werden. Da diese wahrscheinlich nicht auf einem Universaltarget vereint werden können, ist ein schneller Wechsel zwischen verschiedenen Targets notwendig.

4 Konzept

Der Kalibrierstand besteht im Hauptaugenmerk aus einer definierten und beleuchteten Targetebene und einer Kamera samt abbildendem System. Hierfür werden Halterungen benötigt, über die die Position der Kamera relativ zum Target geregelt werden kann. Mit weiteren Komponenten werden dann zusätzliche Anforderungen aus Kapitel 3 umgesetzt. Die gewonnenen Kamerabilder werden am PC angezeigt und verarbeitet. Der gesamte Aufbau wird im Labor EKoPlasma auf einem optischem Tisch aufgebaut und montiert.

Um den stetig wechselnden Anforderungen des Prüfstandes gerecht zu werden, ist es sinnvoll, auf eine modulare Bauweise zu setzen. Dadurch können jederzeit neue Komponenten in den Prüfstand integriert, aber auch Änderungen einfach umgesetzt werden.

4.1 Positionierung

Die Positionierung vom Target relativ zur Kamera kann entweder durch Variation der Kameraposition oder über das Target eingestellt werden. Dabei ist es von Vorteil, den großen Verstellweg in x-Richtung mit einer Schiene parallel zur optischen Achse umzusetzen, was eine Grobeinstellung des Fokuspunktes ermöglicht. Die Feinjustage auf allen drei Achsen ist mithilfe von Präzisionsverstelltischen mit Mikrometerschraube am einfachsten umzusetzen. Auf der Schiene entlang der optischen Achse ist es ausreichend, wenn entweder das Target oder die Kamerasysteme verschiebbar sind. Weitere Komponenten können fest auf dem optischen Tisch montiert werden. Lineartische mit Mikrometerschrauben und einer Abstandsvariation von 10 cm sind unter den verwendeten Bauteilen recht groß und schwer, weswegen es sinnvoll ist, diese statisch auf dem Tisch zu befestigen und nicht entlang der optischen Achse zu verschieben. Auch die Kamerasysteme können große Dimensionen annehmen, während das Target mit Beleuchtung und Halterung vergleichsweise klein bleibt. Aus diesem Grund werden im Aufbau die Kamerasysteme fest auf dem optischen Tisch montiert und sind im Mikrometerbereich in alle Raumrichtungen verstellbar, während das Target entlang der optischen Achse verschiebbar ist (siehe Abbildung 4.1).

Um die Kameraposition verifizierbar in allen drei Raumrichtungen regeln zu können, gibt es zum einen die Möglichkeit drei Lineartische zu kombinieren, oder einen Hubtisch mit zwei Lineartischen zu koppeln. Bei einem Hubtisch wirkt der Schwerpunkt der montierten Systeme zentral von oben auf den Hubtisch, wodurch auch hohe Nutzlasten präzise verfahren werden können. Bei der Kombination von drei Lineartischen hingegen, ist der Schwerpunkt der Kamerasysteme exzentrisch zur Befestigung. Die Nutzlast wirkt über einen Hebelarm auf das System und kann dieses leicht verkippen, weswegen eine Befestigung über den Hubtisch bevorzugt wird. Hubtische verfügen jedoch meist nur über einen kurzen Verstellweg in z-Richtung. Um diesen zu erweitern, wird über die Targetbefestigung ebenfalls eine grobe Höhenverstellung ermöglicht.

Die Steuerung des Kalibrierstandes kann sowohl elektrisch als auch mechanisch erfolgen. Eine

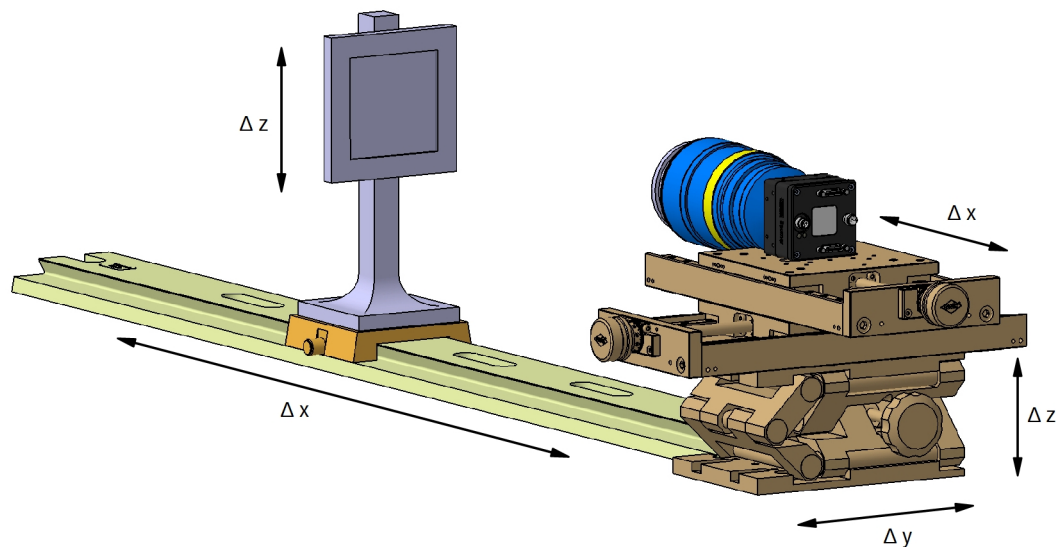


Abbildung 4.1: Positionsregelung mit Target und Kamera samt abbildendem System. Das Target ist grob in x- und z-Richtung positionierbar, während die Feinjustierung über die Kameraposition erfolgt, welche im Mikrometerbereich verifizierbar in alle drei Raumrichtungen variiert werden kann.

elektrische Verstellung hat den Vorteil, dass während dem laufendem Test kein direkter Zugriff auf das System notwendig ist. Elektrisch verstellbare Linear- und Hubtische sind jedoch deutlich teurer und schwerer als mechanische. Außerdem wird hierfür Steuersoftware benötigt, weswegen der Messstand im Folgenden mit mechanischen Bauteilen aufgebaut wird.

Um nach erfolgreicher Justage die Kamerasysteme, ohne diese erneut zu verstellen, in das Versuchsssetup von EKoPlasma einbauen zu können, empfiehlt es sich, diese samt Halterung in den Messstand zu integrieren. Der Vorteil ist hier, dass über Adapterplatten nahezu jedes Kamerasetup in den Prüfstand integriert werden kann. Neue Systeme werden schnell und fest mit dem Hubtisch verschraubt und können zunächst präzise justiert und kalibriert werden. Die fertig kalibrierten Systeme werden dann samt Halterung in das Versuchsssetup von EKoPlasma eingebaut. Eine erneute Justage ist somit nicht mehr notwendig. Die Systeme müssen dann lediglich noch auf die gewünschte Position ausgerichtet werden.

4.2 Umgebung und Zugriff auf das Experiment

Da sich der Aufbau in einem Labor mit mehreren Arbeitsplätzen befindet, ist eine abgedunkelte und staubfreie Umgebung nicht gegeben. Um diese Umgebung zu schaffen, wird der gesamte Aufbau mit einem licht- und staubdichten Kasten umschlossen. Um Zugriff auf den Prüfstand zu ermöglichen, gibt es unter anderem die Möglichkeit seitlich Schiebetüren zu integrieren, oder abnehmbare Seitenwände einzusetzen. Außerdem bietet die Firma ThorLabs ein Kastensystem an, bei dem eine Seitenwand sowie ein Teil des Deckels nach oben aufgeklappt werden kann [12]. Dieses System ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Ein besonderer Vorteil ist hier, dass ein großräumiger Zugriff auf den Prüfstand ermöglicht wird und Änderungsarbeiten bequem durchgeführt werden können.



Abbildung 4.2: Kastenbau der Firma ThorLabs [12]

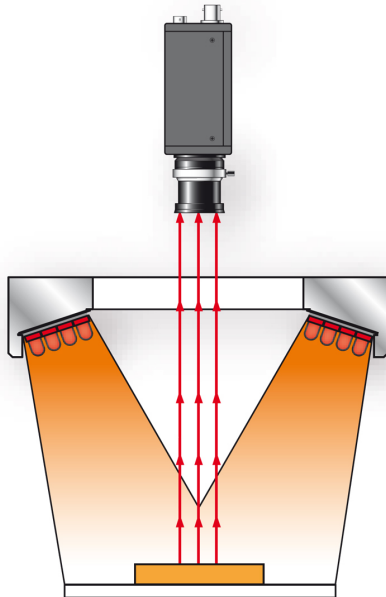
Zusätzlich ist ein Zugriff auf die laufende Kalibrierung notwendig, um die Feinjustierung der Kameraposition live am Bildschirm beobachten zu können. Wichtig ist hierbei, dass trotz Zugriff das System weiterhin abgedunkelt bleibt. Würde die Schiebetür geöffnet oder eine Seitenwand abgenommen werden, wird der Kalibrierstand mit Umgebungslicht aus dem Labor geflutet. Ein Zugriff auf den Hubtisch mit Kamera ist ausreichend, da hierüber die Feinpositionierung des Systems erfolgt. Es besteht die Möglichkeit, eine Seite des Kasten mit einem Vorhang abzudunkeln. Der Experimentator kann durch den Vorhang greifen und dennoch darauf achten, dass die Öffnung verhängt bleibt.

4.3 Target und Beleuchtung

Für die Wahl der Targetbeschaffenheit ist vor allem die Beleuchtungsart [13] entscheidend. Eine optimale Beleuchtung ist ausschlaggebend für die Qualität der Bildaufnahme und vermeidet Informationsverluste, welche die Auswertung erschweren bzw. verfälschen würden. Es wird zwischen Aufsicht- (Abbildung 4.3(a)) und Durchlichtbeleuchtung (Abbildung 4.3(b)) unterschieden. Bei der Aufsichtbeleuchtung wird, von Seiten der Kamera aus, die raue und wenig reflektierende Targetoberfläche mit einem Ringlicht beleuchtet. Bei der Durchlichtbeleuchtung befindet sich eine diffuse Leuchtfläche hinter dem Target. Auf dem Target sind abschattende Strukturen eingebracht, wodurch ein klar definiertes Schwarz-Weiß-Muster entsteht. Eine weitere Möglichkeit der Beleuchtung ist die transmissive Beleuchtung, bei der das Target selbst zum Leuchten gebracht wird. Dabei wird ein Laserstrahl in das transparente Target eingekoppelt, welcher dann an eingearbeiteten Mikrolinsen gestreut wird (Abbildung 4.3(c)).

Mit einer Durchlichtbeleuchtung können Bilder mit sehr starken Kontrastwerten erzeugt werden. Auch beim selbstleuchtenden Target ist der Unterschied zwischen hell und dunkel klar definiert. Beim frontal beleuchteten Target hingegen wird das gesamte Target beleuchtet. In der Kamera ist der Hell-Dunkel-Kontrast nur durch Farbunterschiede gegeben. Je nach Targetoberfläche und Lichteinfallswinkel kann das Bild, aufgrund von Lichtreflexen und Spiegelungen, unbrauchbar werden.

Aufgrund der Dispersion sind die Brechungseigenschaften von Linsen abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes. In das selbstleuchtende Target wird Laserlicht monochromatischer



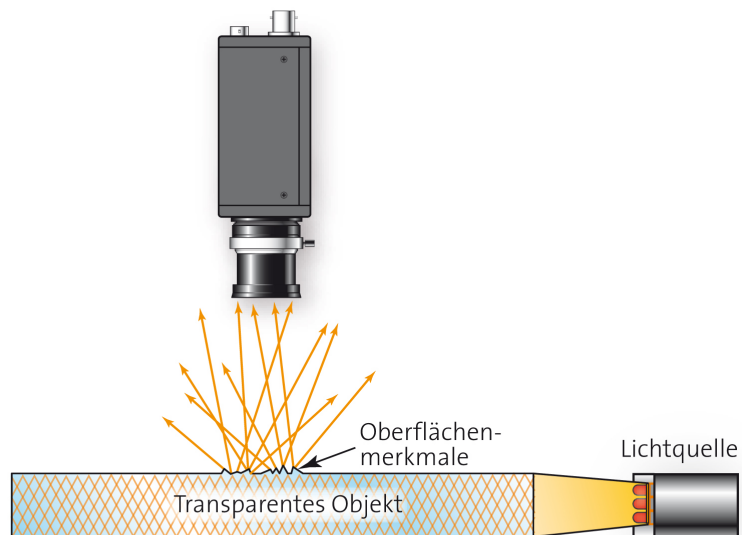
© STEMMER IMAGING

(a) Auflichtbeleuchtung



© STEMMER IMAGING

(b) Durchlichtbeleuchtung



© STEMMER IMAGING

(c) transmissive Beleuchtung

Abbildung 4.3: Mögliche Beleuchtungsarten für das Target [13]

Wellenlänge eingekoppelt und an Mikrolinsen gestreut, was auch dem Versuchsaufbau in EKoPlasma entspricht. Fehler wie die chromatische Aberration treten hierbei nicht auf. Allerdings wird in EKoPlasma mit verschiedenen Lasern unterschiedlicher Wellenlänge gearbeitet, wodurch auch im Prüfstand eine Anpassung der Wellenlänge erforderlich wird. Durchlicht- und Ringbeleuchtung sind mit polychromatischem Licht (weiß) erhältlich, aber auch farbig in definierten Wellenlängen. Vor den Kameras in EKoPlasma sind üblicherweise Laserfilter montiert. Da diese nur schmalbandiges Licht durchlassen, sind polychromatische Lichtquellen für die Anforderungen des Prüfstandes ebenso geeignet, wie monochromatische und haben sogar den Vorteil, dass die Wellenlänge der Lichtquelle nicht für jeden Versuch angepasst werden muss.

Durchlichttargets sind bereits im freien Handel verfügbar, während für selbstleuchtende Targets Spezialanfertigungen notwendig sind. Neue Targetmuster können mit dem Durchlichttarget somit leichter umgesetzt werden. Bei der Aufsichtbeleuchtung können Targets bereits mit hochwertigen Druckern gefertigt werden. Eine Umsetzung neuer Bildmuster ist hier somit besonders leicht realisierbar.

In Tabelle 4.1 sind wichtige Eigenschaften der verschiedenen Beleuchtungen noch einmal zusammengefasst. Außerdem sind hier weitere Faktoren gezeigt, wie Preisvergleiche oder die Homogenität der Leuchtfläche. Die Preise können je nach Qualität, Größe der Leuchtfläche oder Präzision der Targets stark variieren. Die hier aufgelisteten Preise geben einen groben Überblick in der Preiskategorie, welche den Anforderungen des Prüfstandes entsprechen würde. Die subjektive Beurteilung einiger Eigenschaften ist in Kategorien von ++ (sehr gut) bis -- (sehr schlecht) mit den jeweiligen Zwischenschritten +, 0 und – eingeteilt.

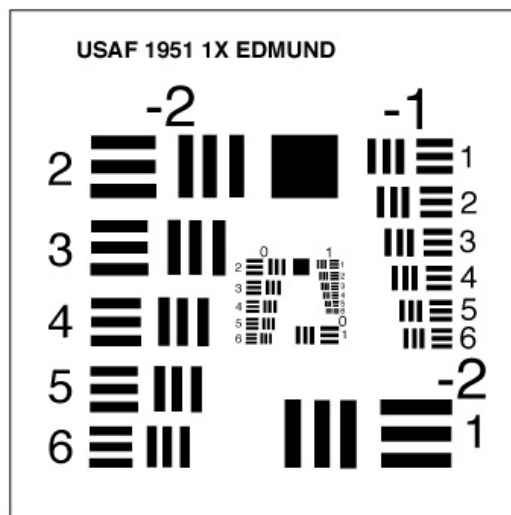
Nach Vergleichen der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Beleuchtungsarten wird der Prüf- und Messstand zunächst mit einer Durchlichtbeleuchtung aufgebaut. Aufgrund der modularen Bauweise können andere Beleuchtungsarten nachträglich jederzeit ergänzt werden.

Tabelle 4.1: Überblick über verschiedene Beleuchtungsarten und deren Vor- und Nachteile

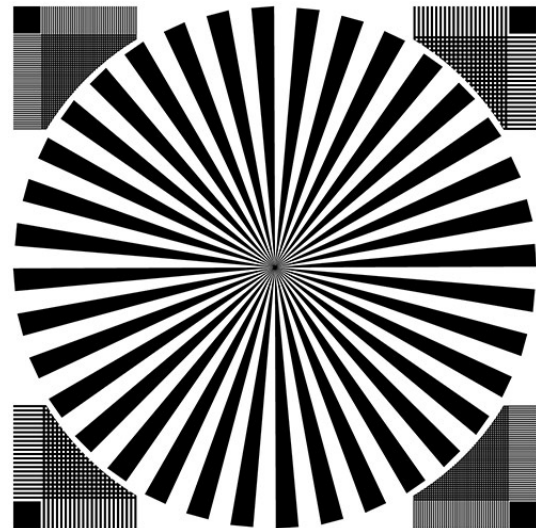
| Beleuchtungsart | Aufsichtbeleuchtung | Diffuse Durchlichtbeleuchtung | Transmissive Beleuchtung |
|---|---|--|--|
| Targetbeschaffenheit | Matte und wenig reflektierende Oberfläche | Transparent mit abschattenden Strukturen | Optisch leitend mit Zerstreuungslinsen |
| Kontrastwerte | 0 | ++ | ++ |
| Emittierte Wellenlänge | Mono- und polychromatisch | Mono- und polychromatisch | Monochromatisch, Laserlicht |
| Homogenität | + | ++ | ++ |
| Helligkeit regulierbar | ja | ja | ja |
| Einbau in stetig wechselnde Versuchsaufbauten | – | + | + |
| Testen neuer Targetmuster | ++ | – | -- |
| Preis für Beleuchtung | ~ 700 € | ~ 400 € | ~ 100 € |
| Preis je Target | ~ 20 € | ~ 250 - 500 € | ~ 1000 - 2000 € |

Um verschiedene Abbildungsfehler im System zu erkennen, werden unterschiedliche Anforderungen an das Target gestellt. Dabei ist es ratsam, verschiedene Targets zu verwenden. Abbildung 4.4 zeigt eine Auswahl an verschiedenen Targetmustern, welche im Prüfstand Anwendung finden könnten. Mit dem USAF 1951 Target kann die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) des abbildenden Systems bestimmt werden. Außerdem eignet es sich gut, um ein System definiert auf den Fokuspunkt scharf zu stellen. Der Siemensstern bietet eine weitere Möglichkeit, um Fokussierungsfehler zu vermeiden. Das System befindet sich im Fokuspunkt, wenn der Unschärfekreis in der Mitte minimal wird. Außerdem eignet es sich zur Charakterisierung von Abbildungsfehlern, welche die Bildschärfe beeinflussen, wie Astigmatismus. Das Punktgitter dient der Ermittlung von Verzeichnungsfehlern. Mit diesem Testbild kann einfach festgestellt werden, wieweit sich Bildpunkte in welche Richtung verschoben haben. Mittels Computersoftware wird die genaue Position der Teilchen ermittelt und mit den Originalpositionen verglichen. Bei dem Target zur Schärfentiefemessung beträgt der Abstand zweier Linien $\sqrt{2}$ mm (Bild nicht maßstabsgetreu). Bei Betrachtung unter 45° sind die Linien somit um 1 mm in horizontaler und 1 mm in vertikaler Richtung versetzt. Ein etwas einfacheres Target stellt ein mm-Raster dar mithilfe dessen das Field of View einer Kamera ermittelt werden kann. Sind außerdem bestimmte Sensordaten der Kamera bekannt, kann mit dem Target der Abbildungsmaßstab berechnet werden.

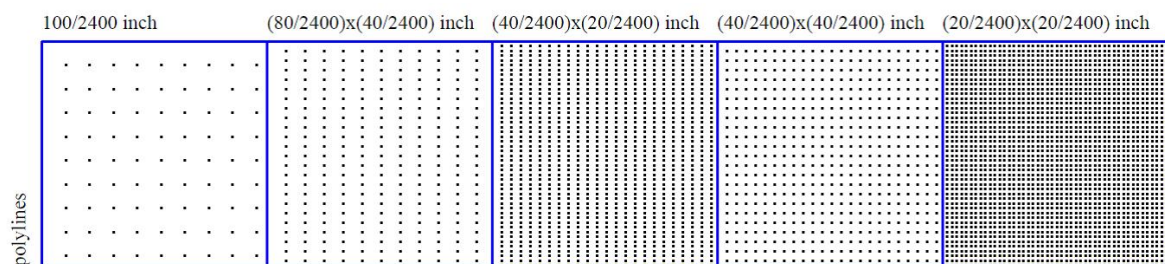
Die Firma Edmund Optics verkauft Durchlichttargets mit verschiedenen Chrom-Mustern auf Glas, welche eine einheitliche Größe von 3×3 Zoll und eine Dicke von 1,5 mm haben. Zwischen den einzelnen Targetmustern sollte ein einfacher Wechsel möglich sein. Um das umzusetzen, können die Targets in einer Nut direkt vor die Beleuchtung geschoben werden. Somit ist nur noch eine Halterung für Target und Lampe notwendig, welche dann entlang der optischen Achse verschoben werden kann. Die grobe Höhenverstellung des Targets wird mit einem horizontalen Profilstab umgesetzt, an dem die Targetlampe festgeschraubt ist, und der bei Bedarf in der Höhe variiert werden kann. Die Feinjustierung erfolgt dann über den Hubtisch der Kamera. Um den 45° -Winkel für die Schärfentiefe und eventuelle 3D-Analysen zu erhalten, wird ein verstellbarer Winkel zwischen Halterung und dem Stab zur vertikalen Verstellung eingebaut.



(a) USAF 1951 Target [14]

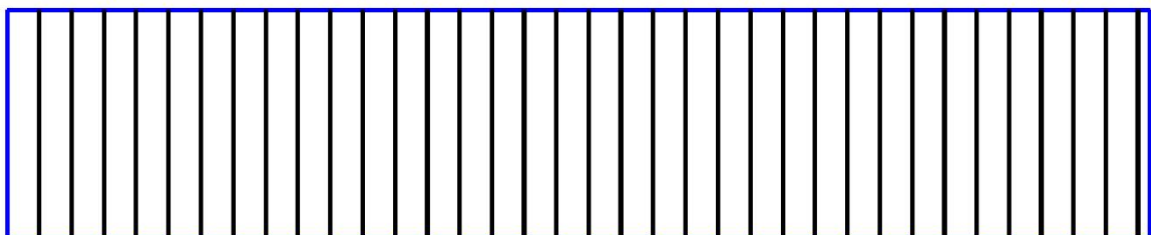


(b) Siemensstern [15]



(c) Punktgitter mit unterschiedlichen Frequenzen

1.00 mm under 45 degree



(d) Schärfentiepen Messung

Abbildung 4.4: Mögliche Targetmuster, welche im Prüfstand Anwendung finden könnten

5 Konstruktion und Aufbau des Kalibrierstandes

In diesem Kapitel wird das Konzept aus Kapitel 4 mit konkreten Bauteilen umgesetzt. Dabei wird auf wichtige Grunddaten der einzelnen Bauteile eingegangen, sowie deren Zusammenwirken erläutert. Von käuflich erworbenen Bauteilen befinden sich Datenblätter mit weiteren Bauteileigenschaften im Anhang. Bei selbst gefertigten Komponenten ist im Anhang eine Konstruktionszeichnung zu finden.

Der Grundaufbau des Kalibrierstandes besteht zum einen aus einer optischen Schiene, auf der ein Schlitten mit der Targethalterung in x-Richtung verfahrbar ist, und zum anderen aus zwei Lineartischen und einem Hubtisch mit Mikrometerschraube zur Positionierung der Kamera (siehe Abbildung 4.1). Die Targethalterung ist aus weiteren Einzelteilen zusammengebaut, wodurch weitere verstellbare Achsen ermöglicht werden. Schiene und Schlitten werden von der Firma Newport käuflich erworben (Modell: PRL-36 und M-PRC-3), wobei die Schiene einen Verstellweg von $\Delta x = 900$ mm aufweist. Auch der Hubtisch ist von Newport (Modell: 271). Er verfügt über einen Verstellweg in z-Richtung von $\Delta z = 44,5$ mm und ist besonders für eine präzise Positionierung hoher Lasten bis 900 N ausgelegt. Die Lineartische stammen von der Firma OWIS (Typ: LT 120-140) und ermöglichen eine x-y-Positionierung der Kamera von $\Delta x = \Delta y = 140$ mm.

Für Target und Hintergrundbeleuchtung wird eine gemeinsame Halterung konstruiert. Dabei wird die Lampe der Firma CCS Inc. (Modell: LFL-100SW2) in die Halterung eingefasst, während für das Target ein Rahmen entworfen wird, welcher dann in die Lampenhalterung geschoben werden kann. Abbildung 5.1(a) und 5.1(b) verdeutlichen dieses Prinzip. Der Vorteil ist hier, dass das Target selbst nicht an der Halterung entlang streift und somit nicht verkratzt. Da die Dimensionen der Targets von Edmund Optics für unterschiedliche Muster gleich bleiben, können in den Rahmen jederzeit neue Targets eingesetzt und vor die Lampe geschoben werden, was einen einfachen Wechsel zwischen den Targets ermöglicht. Ändern sich die Dimensionen des Targets, kann ein neuer Rahmen mit angepassten Maßen entworfen werden, sodass auch diese in die Halterung geschoben werden können. Der Rahmen wird im 3D-Drucker aus Epoxidharz gefertigt. Eine Konstruktionszeichnung ist im Anhang zu finden.

Die Halterung wird in der hauseigenen Werkstatt aus Aluminium gefertigt. Aus fertigungstechnischen Gründen besteht diese aus drei Teilen, welche miteinander verschraubt werden. Im hinteren Teil wird die Lampe eingefasst. Der mittlere Teil deckt die Lampe ab und enthält eine Nut, in welcher der Targetrahmen eingeschoben werden kann. Der dritte Teil bildet die Frontplatte mit einem Ausschnitt, durch den das Targetmuster beobachtet werden kann (siehe Abbildung 5.1(a)). Um ungewollte Lichtreflexionen zu vermeiden, werden die Bauteile anschließend schwarz eloxiert. Die Halterung wird dann über einen verstellbaren Winkel an einer senkrechten Profilstange mit einer Länge von 350 mm befestigt. Darüber ist das Target grob in der Höhe verstellbar und kann in vertikaler Richtung geneigt werden, was die Möglichkeit der schiefen Ebene realisiert (siehe Abbildung 5.2). Der Winkel ist von der Firma ThorLabs (Modell: AP180/M) und kann in 15°-Schritten um bis zu 180° geneigt werden.

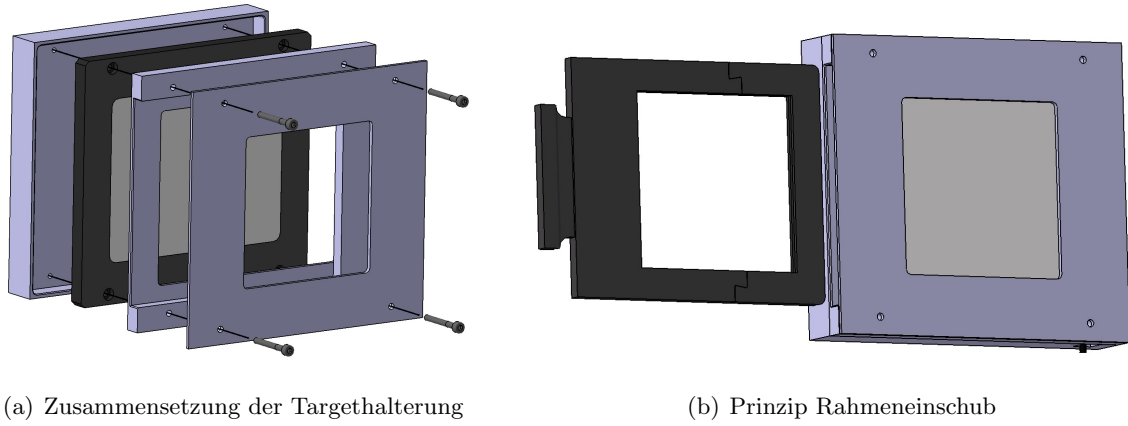


Abbildung 5.1: Zusammensetzung der Targethalterung

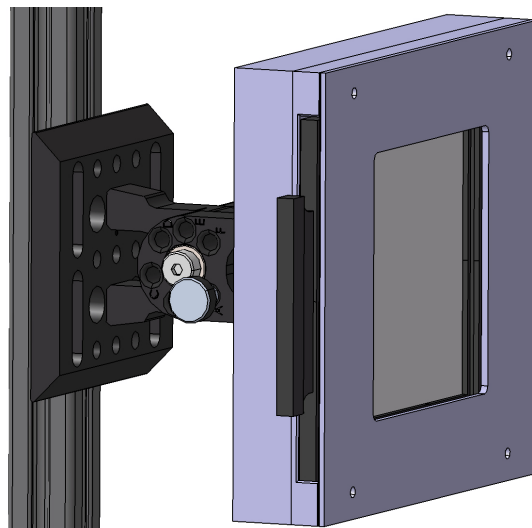


Abbildung 5.2: Befestigung der Targethalterung mit verstellbaren Winkel

Um diesen Aufbau dann spielfrei auf dem optischen Schlitten befestigen zu können, sind mindestens drei Fixierpunkte notwendig. Hierzu wird ein Adapter konstruiert, in den die Profilstange eingeführt und befestigt werden kann. Zwischen optischen Schlitten und Adapter befindet sich noch eine Rotationsplattform der Firma Qioptiq Photonics (Modell: RT 60), mit der das Target um die z-Achse rotiert werden kann. Das ermöglicht eine Ausrichtung der Objektebene zur Bildebene. Außerdem kann somit auch in horizontaler Richtung eine schiefe Ebene realisiert werden.

Abbildung 5.3 zeigt die Zusammensetzung der Befestigung von Targethalterung und Profilstange auf dem Schlitten. Hier wird auch die Form des Adapters gezeigt. Eine Konstruktionszeichnung des Adapters ist im Anhang enthalten. Der Halter der Profilstange wird ebenfalls in der hauseigenen Werkstatt aus Aluminium gefertigt und anschließend schwarz eloxiert.

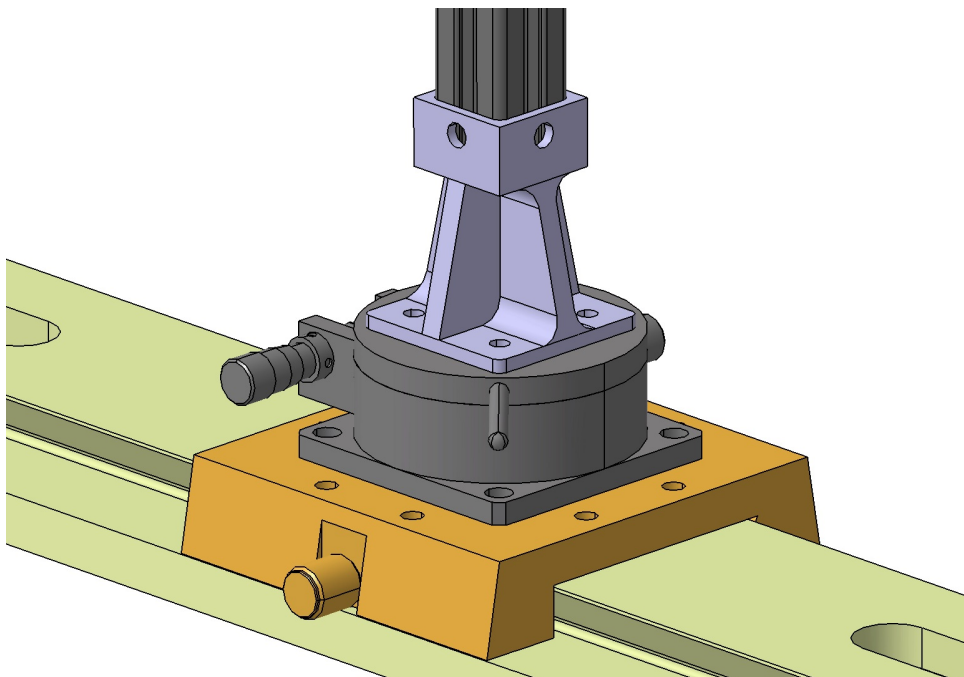


Abbildung 5.3: Befestigung der Profilstange auf dem Schlitten

Abbildung 5.4 zeigt den fertigen Grundaufbau des Kalibrierstandes mit all seinen verstellbaren Achsen.



Abbildung 5.5: Querschnitt Profilstange

Um die abgedunkelte und staubfreie Umgebung zu erzeugen, wird der Grundaufbau mit einem licht- und staubdichten Kasten nach dem Prinzip der Firma ThorLabs umgeben (Abbildung 4.2). Das Gehäuse wird dabei auf die benötigten Dimensionen angepasst. Es werden Außenmaße von 1400 mm × 520 mm × 520 mm veranschlagt, wodurch innerhalb genügend Platz für Erweiterungen und Änderungsarbeiten bleibt. Der Aufbau ist mit Profilstangen der Firma item deutlich günstiger umzusetzen. Die Firma bietet Profilstreben mit einem Querschnitt von 20 mm × 20 mm an (Profil 5 20x20). Da die Streben keine großen Lasten tragen müssen, ist dieser Profilquerschnitt

ausreichend. Ein Bild vom Querschnitt der Profilstangen ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Profilstangen verfügen in Längsrichtung über Nuten, in welche die Seitenwände eingeschoben

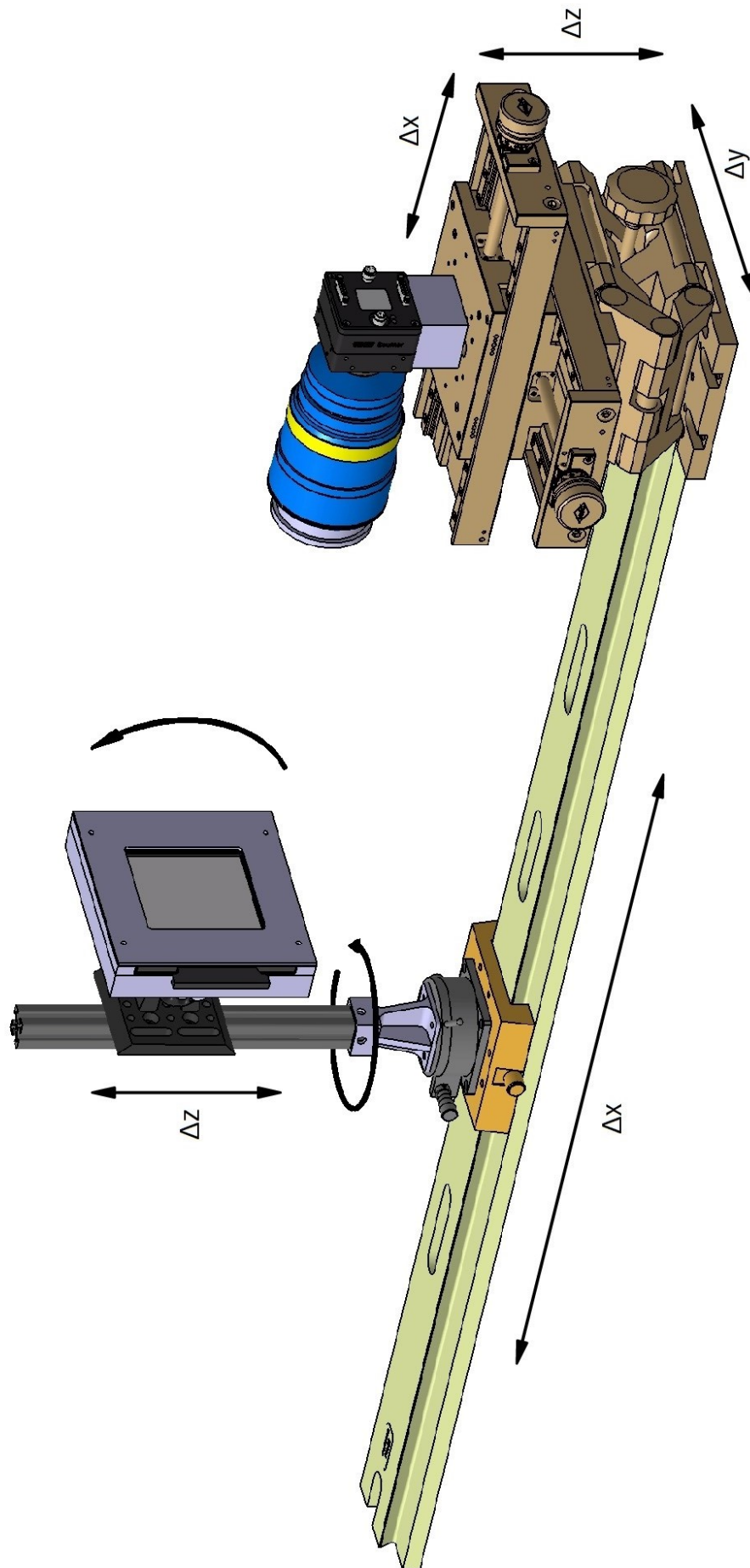


Abbildung 5.4: Fertiger Grundaufbau des Kalibrierstandes mit allen verstellbaren Achsen

werden können. Hierfür werden lichtabsorbierende Hartschaumplatten der Firma ThorLabs verwendet (Modell: TB4). Diese haben eine Materialstärke von 5 mm und passen somit genau in die Nut der Profilstreben. Die Hartschaumplatten sind mit einem lichtabsorbierenden Karton überzogen und lassen sich mit einem Cuttermesser auf die gewünschte Größe zuschneiden. Die Seitenwände in der Profilnut zu versenken hat den Vorteil, dass das Gehäuse auch in den Kanten und Ecken lichtdicht abschließt. Um auch die Türschlitze abzudichten, werden die Profilstangen im Türbereich mit Gummidichtungen versehen.

Der Zugriff auf den laufenden Kalibriervorgang erfolgt über eine Stirnseite des Gehäuses. Hier wird eine Seitenwand durch einen lichtdichten Vorhang der Firma ThorLabs (Modell: BK5) ersetzt, welcher mit Klettverschluss an den Profilstangen befestigt und je nach Bedarf auch komplett abgenommen werden kann.

An der Rückwand des Kalibrierstandes wird außerdem ein Zugang zur Kabeldurchführung integriert. Hierfür wird ein Baukastensystem der Firma icotek (Typ: KEL-U 10|6) verwendet, in welches bis zu sechs Kabeltüllen, mit einem Leitungsdurchmesser von 2 mm bis 36 mm, eingebaut werden können. Das Kabeleinführungssystem ist nach Schutzart IP54 zertifiziert und gegen Staub und Spritzwasser geschützt. Eine lichtdichte Kabeleinführung wird dadurch ebenfalls realisiert. Um die Kabeleinführung an der hinteren Seitenwand zu befestigen, wird ein Winkel aus Aluminium konstruiert, welcher die Kabeleinführung hält und selbst an der Profilstange des Rahmens befestigt ist (siehe Abbildung 5.6). Die Rückwand befindet sich zwischen Winkel und Kabeleinführung.

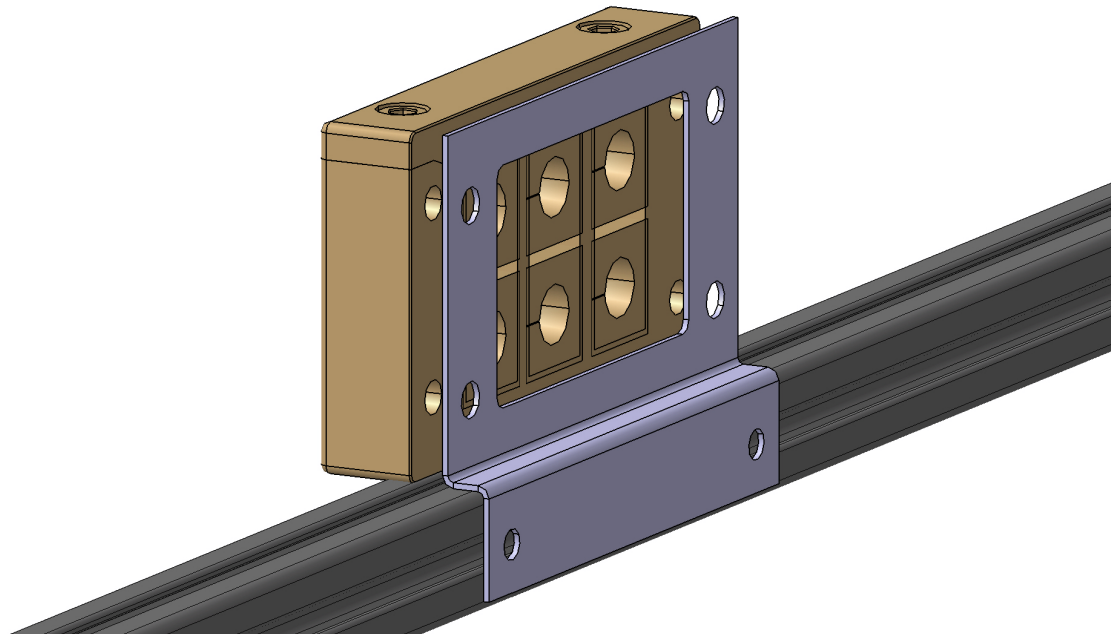


Abbildung 5.6: Kabeleinführung an der Rückwand des Kalibrierstandes mit Winkel zur Befestigung am Rahmen. Die Rückwand befindet sich zwischen Winkel und Kabeleinführung.

Der Kalibrierstand ist somit fertig aufgebaut. Abbildung 5.7 zeigt ein Foto des fertig aufgebauten Kalibrierstandes, in welchem gerade eine Kamera aus Kapitel 6 mit dem USAF 1951 Target betrieben wird.

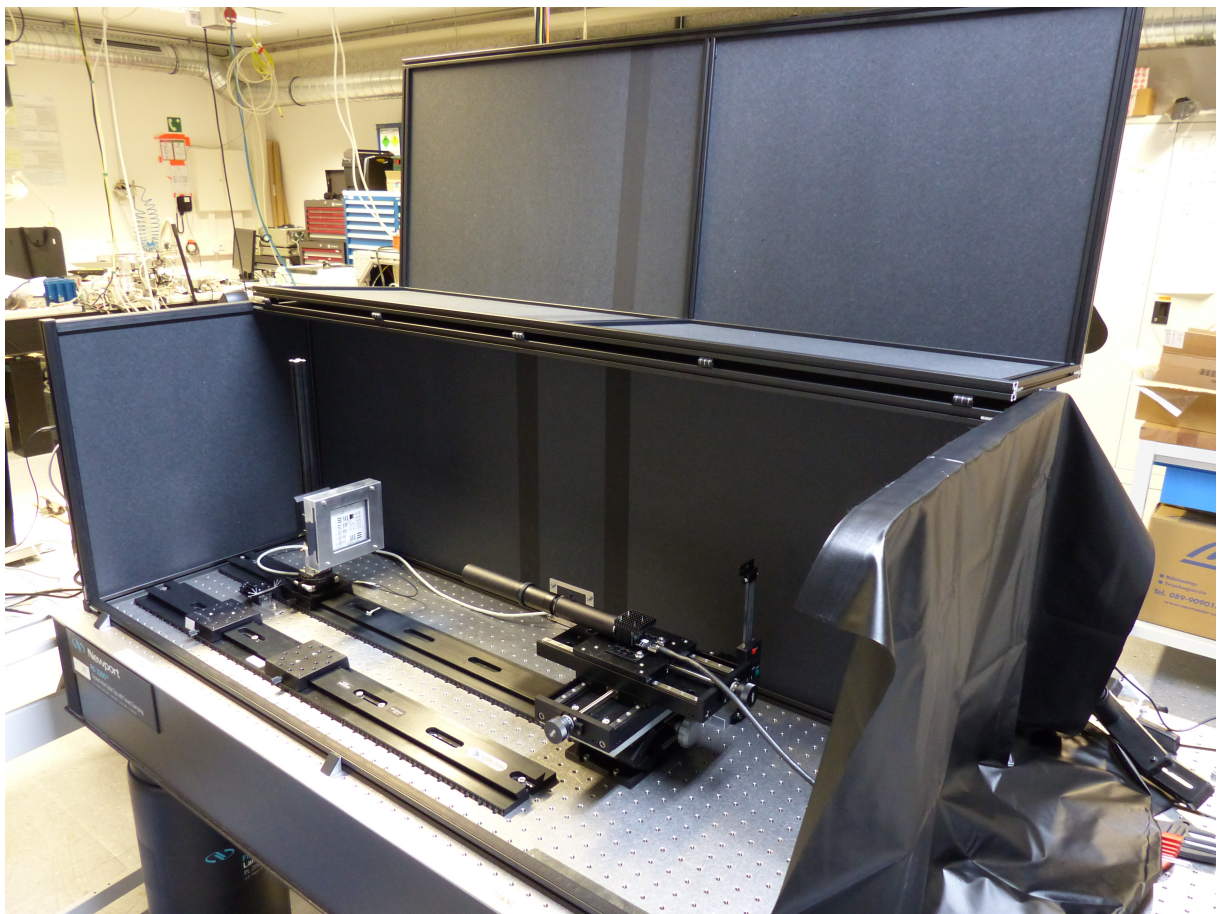
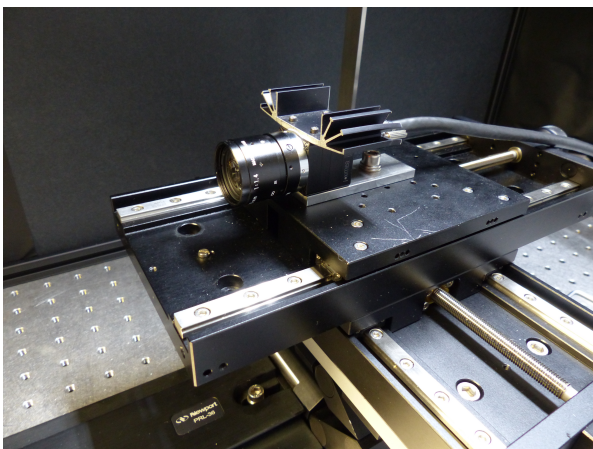


Abbildung 5.7: Fertig aufgebauter Kalibrierstand.

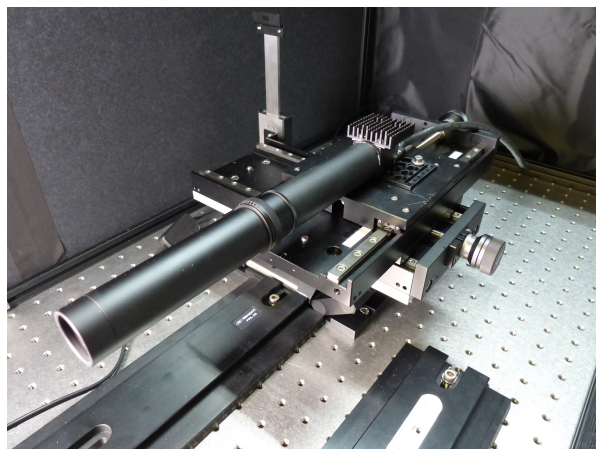
6 Technische Validierung

In diesem Kapitel wird die Funktionsfähigkeit des Prüfstandes beispielhaft anhand einiger Versuche getestet. Es werden verschiedene Abbildungseigenschaften an verschiedenen Kamerasystemen untersucht. Dadurch wird sowohl gezeigt, dass ein schneller Einbau neuer Systeme und Targets möglich ist, aber auch dass die verschiedenen Abbildungseigenschaften mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Bei der Untersuchung einzelner Abbildungsfehler wird angenommen, dass weitere, im System auftretende Abbildungsfehler, zu vernachlässigen sind.

Für die Versuche stehen zwei verschiedene Kameras mit Objektiven zur Verfügung. Zum einen wird die Kamera **Ximea MQ013MG-ON** (Abbildung 6.1 (a)) verwendet, welche mit 1,3 Mpx ($1280 \text{ px} \times 1024 \text{ px}$) und einer Bildrate von bis zu 150 fps arbeitet. Die Sensorgröße der Kamera beträgt 6,18 mm auf 4,95 mm. Vor der Kamera ist ein Normalobjektiv Pentax C1614-M 1:1,4 mit einer Brennweite von 16 mm, verstellbarem Fokus und Blende und einem horizontalen Öffnungswinkel von 31° montiert. Die zweite Kamera ist eine **Ximea MQ042MG-CM** (Abbildung 6.1 (b)) mit 4,2 Mpx ($2048 \text{ px} \times 2048 \text{ px}$), einer Sensorgröße von 11,27 mm in horizontaler und vertikaler Richtung und arbeitet mit einer Bildrate von bis zu 90 fps. Vor der Kamera ist ein selbstgebautes Teleobjektiv nach Abbildung 6.2 mit nur einer Linse montiert. Die plan-konvex-Linse aus dem Material N-BK7 hat eine Brechkraft von $n = 1,515$ bei 633 nm und eine Brennweite von 100 mm. Bei einer Bild- und Objektweite von 200 mm ergibt sich nach Gleichung 2.5 ein 1:1 Abbildungsmaßstab.



(a) Ximea MQ013MG-ON



(b) Ximea MQ042MG-CM

Abbildung 6.1: Im Versuch verwendete Kameras

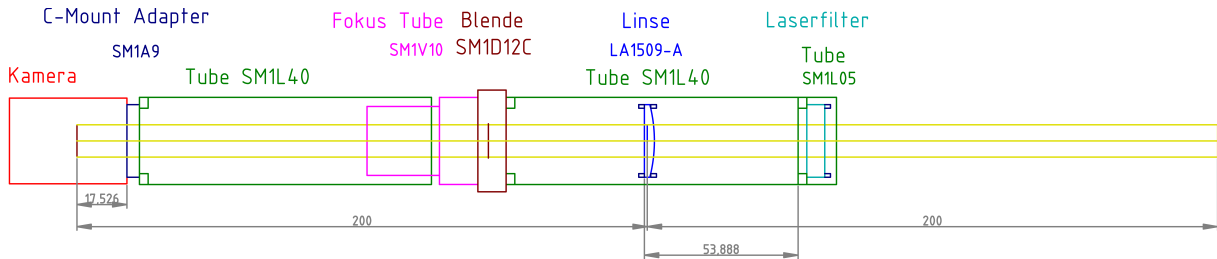


Abbildung 6.2: Aufbau Objektiv der Kamera Ximea MQ042MG-CM

6.1 Versuch: Field of View und Abbildungsmaßstab

Aufbau und Durchführung

Dieser Versuch wird mit beiden oben beschriebenen Kameras durchgeführt. Sie werden dabei über Adapterplatten fest mit dem Hubtisch verschraubt. Als Target dient ein etwa DIN A4 Blatt großes, mit einer Kunststoffplatte verstärktes mm-Raster, welches am Profilstab der Targethalterung befestigt wird. Die Targethalterung mit Durchlichtbeleuchtung wird entfernt. Um das Target dennoch sichtbar zu machen, wird zusätzlich eine Video-Lampe zur Aufsichtbeleuchtung in den Prüfstand integriert.

Die Kameras werden mit dem PC verbunden und das Bild fokussiert. Die Kamera Ximea MQ013MG-ON wird dabei bei minimalem Fokus von 18 mm und einer Blendenzahl 4 betrieben. Bei der Kamera Ximea MQ042MG-CM wird eine Blendenzahl 6 eingestellt. Auf den aufgenommenen Bildern wird dann der gesamte sichtbare Bereich dargestellt. Zusammen mit den Sensorabmaßen der Kamera kann hieraus dann der Abbildungsmaßstab berechnet werden. Zusätzlich wird bei der Kamera Ximea MQ013MG-ON der Öffnungswinkel berechnet und mit dem, im Datenblatt angegebenen, horizontalen Öffnungswinkel verglichen.

Auswertung

- Kamera Ximea MQ013MG-ON

Für die Kamera Ximea MQ013MG-ON ergibt sich nach Abbildung 6.3 folgendes Field of View, getrennt in horizontaler (FoV_h) und vertikaler (FoV_v)-Richtung:

$$FoV_h = (73,7 \pm 0,3) \text{ mm}$$

$$FoV_v = (59,0 \pm 0,3) \text{ mm}$$

Dadurch ergibt sich nach Gleichung 2.5 ein Abbildungsmaßstab von:

$$\beta_h = \frac{Pixel_h}{FoV_h} = \frac{1280 \text{ px}}{73,7 \text{ mm}} = (17,37 \pm 0,07) \text{ px/mm}$$

$$\beta_v = \frac{Pixel_v}{FoV_v} = \frac{1024 \text{ px}}{59,0 \text{ mm}} = (17,36 \pm 0,09) \text{ px/mm}$$

Fehlerrechnung nach Gauß:

$$s_\beta = \frac{Pixel}{FoV^2} * s_{FoV}$$

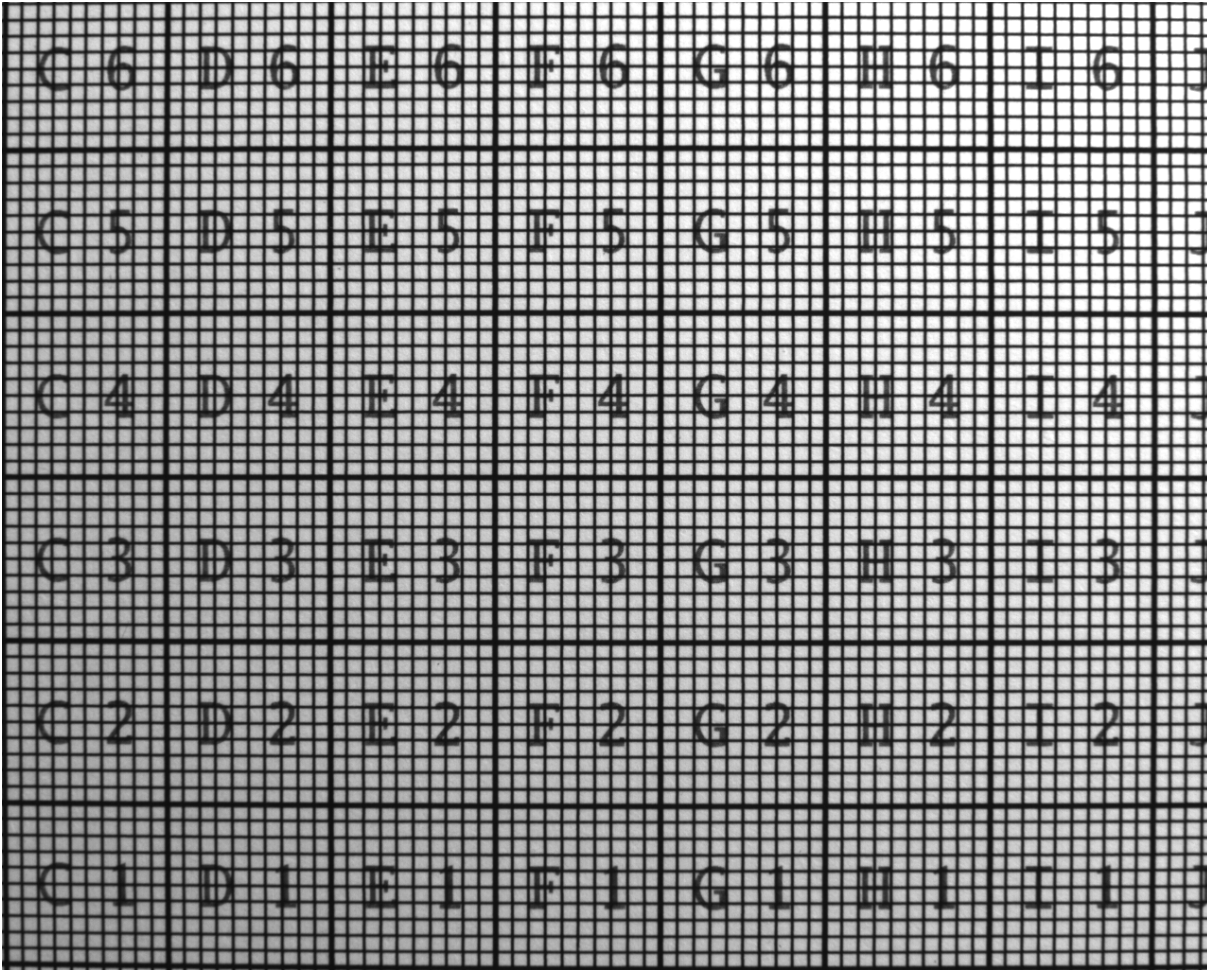


Abbildung 6.3: FoV Kamera Ximea MQ013MG-ON

Bezogen auf die Sensorgröße beträgt der Abbildungsmaßstab:

$$\beta_h = \frac{y_{Sensor}}{FoV_h} = \frac{6,18 \text{ mm}}{(73,7 \pm 0,3) \text{ mm}} = \frac{1}{12}$$

$$\beta_v = \frac{z_{Sensor}}{FoV_v} = \frac{4,95 \text{ mm}}{(59,0 \pm 0,3) \text{ mm}} = \frac{1}{12}$$

Der Öffnungswinkel der Kamera lässt sich mit dem Field of View und dem Abstand der Objektweite nach Gleichung 2.6 berechnen. Die Objektweite beträgt bei Aufnahme des Bildes $a = (-180 \pm 5) \text{ mm}$. Es gilt:

$$\alpha_h = 2 * \arctan\left(\frac{0,5 * FoV_h}{-a}\right) = 2 * \arctan\left(\frac{0,5 * 73,7}{180}\right) = (23,14 \pm 0,01)^\circ$$

Fehlerrechnung nach Gauß:

$$s_\alpha = \sqrt{\left(\frac{-4a}{FoV^2 + 4a^2} * s_{FoV}\right)^2 + \left(\frac{4FoV}{4a^2 + FoV^2} * s_a\right)^2}$$

Der gemessene Öffnungswinkel unterscheidet sich stark von dem, im Datenblatt des Objektivs, angegebenen Öffnungswinkel von 31° . Grund hierfür ist das Zusammenspiel von Kamera und

Objektiv. Das Objektiv bildet die Objektebene auf ein Bildformat von 8,8 mm auf 6,6 mm ab (siehe Datenblatt im Anhang). Die Kamera hingegen hat nur eine Sensorgröße von 6,18 mm auf 4,95 mm. Ein Teil des Bildes wird somit neben dem Kamerasensor fokussiert und wird von der Kamera nicht mit aufgezeichnet. Dadurch ist der Öffnungswinkel des Gesamtsystems deutlich geringer.

Der Unterschied vom Field of View in horizontaler und vertikaler Richtung lässt sich ebenfalls auf den Kamerasensor zurückführen. Dieser hat in y- und z- Richtung unterschiedliche Abmaße, wodurch sich auch der abgebildete Bereich ändert. Wird daraus hingegen der Abbildungsmaßstab berechnet, ist dieser für beide Bildrichtungen gleich.

Des Weiteren ist in Abbildung 6.3 zu erkennen, dass mit der verwendeten Auflichtbeleuchtung keine homogene Bildausleuchtung erreicht wird. Die Videolampe beleuchtet das Target von oben links, weswegen das Bild in dieser Ecke heller erscheint. Aus diesem Grund ist im Kalibrierstand hauptsächlich eine Durchlichtbeleuchtung integriert. Da das Target in diesem Fall relativ groß ist, wurde auf die Auflichtbeleuchtung zurückgegriffen. Für den Versuchszweck ist diese Art der Beleuchtung ausreichend.

- Kamera Ximea MQ042MG-CM

Die Field of View Aufnahme der Kamera Ximea MQ042MG-CM ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Aus dieser ergibt sich ein Field of View in horizontaler und vertikaler Richtung von:

$$FoV_h = (11,0 \pm 0,3) \text{ mm}$$

$$FoV_v = (11,0 \pm 0,3) \text{ mm} = FoV_h$$

Der Abbildungsmaßstab berechnet sich aus:

$$\beta_h = \beta_v = \beta = \frac{\text{Pixel}}{FoV_h} = \frac{2048 \text{ px}}{11,0 \text{ mm}} = (186 \pm 5) \text{ px/mm}$$

Fehlerrechnung nach Gauß:

$$s_\beta = \frac{\text{Pixel}}{FoV^2} * s_{FoV}$$

Bezogen auf die Sensorgröße ist der Abbildungsmaßstab:

$$\beta = \frac{y_{\text{Sensor}}}{FoV_h} = \frac{11,27 \text{ mm}}{(11,0 \pm 0,3) \text{ mm}} = \frac{1}{1}$$

Da sich der Fokuspunkt des Objektivs im doppelten Abstand zur Brennweite befindet, berechnet sich, aus der Theorie nach Gleichung 2.5, ein theoretischer Abbildungsmaßstab von 1:1. Dieser deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Versuch. Sowohl der Sensor als auch das Field of View haben quadratische Abmaße und eine Größe von in etwa 11 mm auf 11 mm.

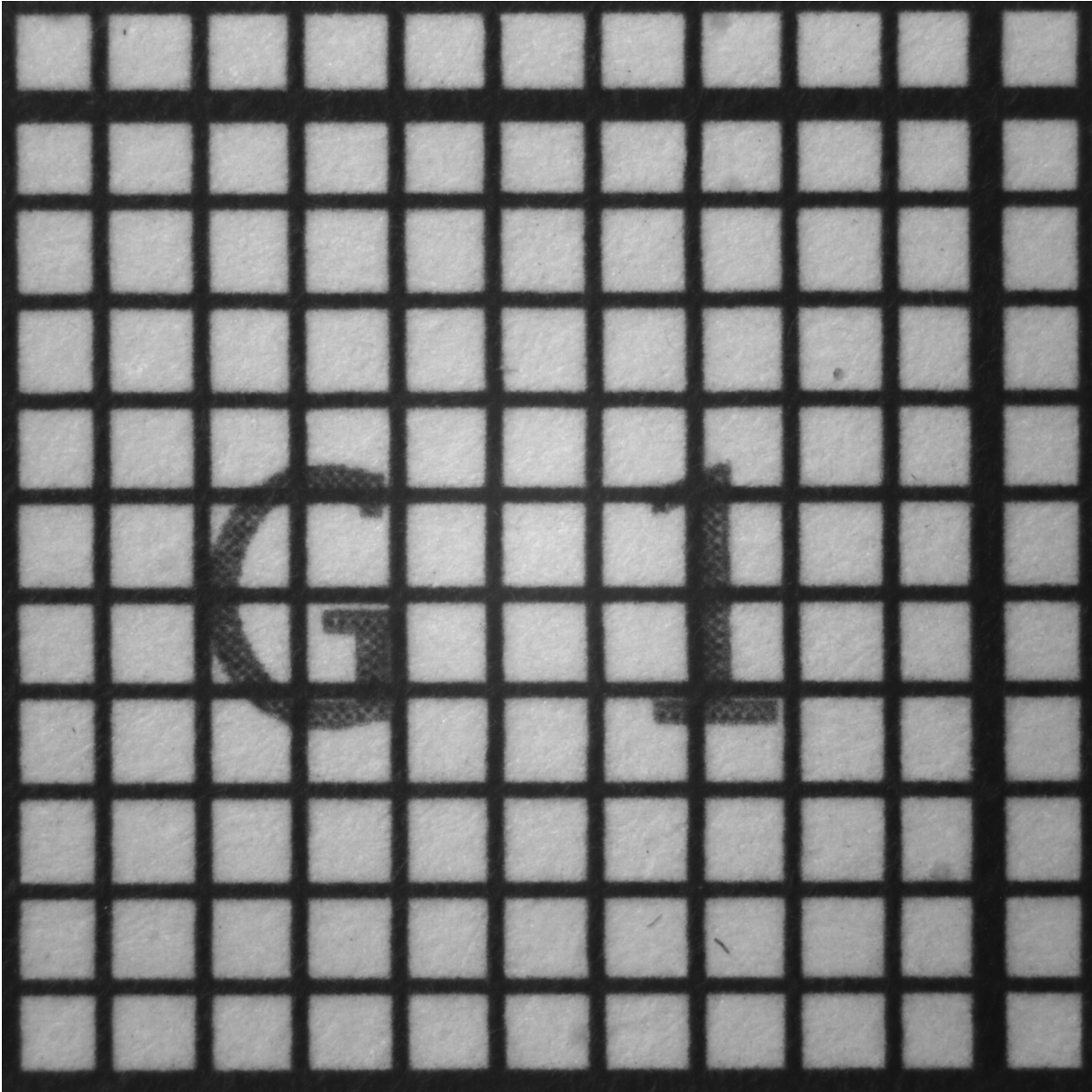


Abbildung 6.4: FoV Kamera Ximea MQ042MG-CM

6.2 Versuch: Bildfeldwölbung

Aufbau und Durchführung

Der Kalibrierstand wird in diesem Versuch wieder mit der Durchlichtbeleuchtung betrieben. Als Target dient ein USAF 1951 Target, welches in der Halterung vor die Leuchtfläche geschoben wird. Das Linienmuster ermöglicht eine genaue Beurteilung zur Einstellung des Fokuspunktes. Der Versuch wird mit der Kamera Ximea MQ042MG-CM durchgeführt, welche bei einer Blendenzahl 6 betrieben wird. Für dieses Kamerasystem sind alle Objektivdaten bekannt, sodass ein theoretischer Wert für die Bildfeldwölbung berechnet werden und mit den Versuchsergebnissen verglichen werden kann. Für die Kamera Ximea MQ013MG-ON liegen keine Informationen über die verbauten Linsen vor, weswegen der theoretische Wert der Bildfeldwölbung nicht berechnet werden kann und der Versuch nicht mit dieser Kamera durchgeführt wird.

Die Bildfeldwölbung des Systems der Kamera Ximea MQ042MG-CM wird sowohl in horizontaler und vertikaler Richtung, als auch für die beiden Bilddiagonalen bestimmt. Dazu wird das System zunächst auf den Bildmittelpunkt scharf gestellt und anschließend auf die beiden gegenüberliegenden Bildränder. Dadurch ergeben sich drei Punkte, aus denen der Kreisradius der Petzvalfläche berechnet werden kann. Die Punkte werden dabei in Vektorkoordinaten aufgenommen, wobei der Bildmittelpunkt als Nullpunkt gewählt wird. Zur Bestimmung des Fokuspunktes wird die maximale MTF bei einer bestimmten Ortsfrequenz definiert. Wird die maximale MTF bei der gewählten Ortsfrequenz erreicht, gilt das System als „scharf“. Dadurch wird der Einfluss des durchführenden Experimentators und die Abhängigkeit seines Empfindens verringert. Für die Kamera Ximea MQ042MG-CM befindet sich das System im Fokuspunkt, wenn bei einer Ortsfrequenz von 36 LP/mm in vertikaler Richtung eine Modulation (Hell-Dunkel-Kontrast) von 0,16 erreicht wird.

Theoretische Berechnung der Bildfeldwölbung

Die Bildfeldwölbung vom Objektiv der Kamera Ximea MQ042MG-CM kann nach Gleichung 2.1 berechnet werden. Das Objektiv verfügt nur über eine Linse mit einer Brennweite von $f = 100$ mm und einem Brechungsindex von $n = 1,515$ bei 633 nm. Daraus ergibt sich ein theoretisch berechneter Krümmungsradius der Petzvalfläche von:

$$\frac{1}{r_p} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i f'_i} = \frac{1}{1,515 * 100 \text{ mm}}$$

$$r_p = 151,5 \text{ mm}$$

Auswertung

Im Anhang befindet sich das Versuchsprotokoll mit den jeweiligen gemessenen Punktkoordinaten. Allgemein ist die Kreisgleichung im zweidimensionalen Raum definiert als:

$$(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 = r^2$$

Dabei sind x_m und y_m die Koordinaten des Kreismittelpunktes, r der Kreisradius und x und y die Koordinaten von den, auf dem Kreis liegenden Punkten. Durch Einsetzen der in einer Ebene

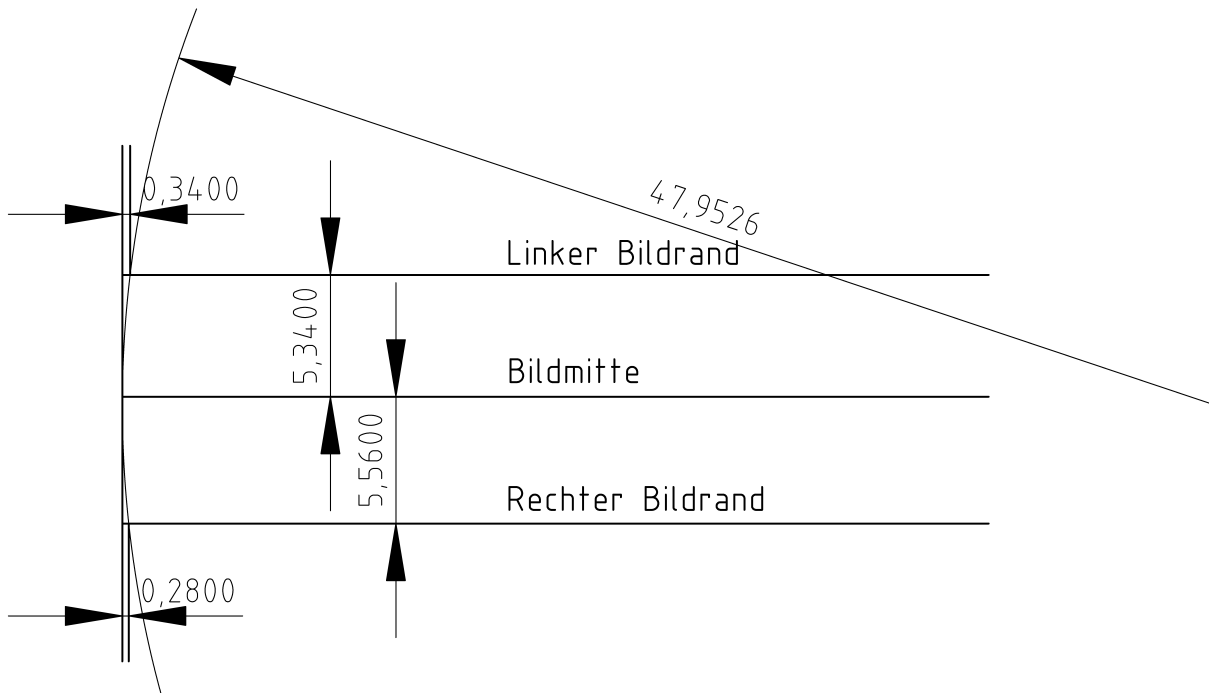


Abbildung 6.5: Prinzip Auswertung Bildfeldwölbung

liegenden Punkte in die Gleichung ergibt sich für die jeweilige Richtung der Bildfeldwölbung ein Gleichungssystem mit drei Gleichungen und drei Unbekannten. Der Kreis ist dadurch eindeutig bestimmt. Grafisch lässt sich das ganze nach dem Prinzip in Abbildung 6.5 auswerten, hierfür die horizontale Bildfeldwölbung. In die Grafik wird der jeweilige Abstand zum Mittelpunkt, sowie die jeweilige Fokusänderung eingezeichnet und der Kreisradius über drei Punkte bestimmt. Bei der diagonalen Bildfeldwölbung muss aus den y- und z-Koordinaten zunächst der Abstand zur Bildmitte berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Bildfeldwölbung der Kamera Ximea MQ042MG-CM

| | |
|---|----------------------------|
| Bildfeldwölbung in horizontaler Richtung | $r_p = 47,9526 \text{ mm}$ |
| Bildfeldwölbung in vertikaler Richtung | $r_p = 57,7487 \text{ mm}$ |
| Bildfeldwölbung diagonal von links oben nach rechts unten | $r_p = 38,7657 \text{ mm}$ |
| Bildfeldwölbung diagonal von rechts oben nach links unten | $r_p = 48,4255 \text{ mm}$ |

Diskussion und Betrachtung der Ergebnisunsicherheit

Verglichen mit dem theoretisch berechnetem Wert der Bildfeldwölbung von $r_p = 151,5 \text{ mm}$, weichen die gemessenen Ergebnisse stark davon ab. Bei Betrachtung der Messunsicherheiten zeigt sich, dass die y- und z-Positionierung auf $s_x = s_y = \pm 0,01 \text{ mm}$ genau bestimmt werden kann. Die Messunsicherheit in x-Richtung ist hingegen deutlich größer. Aufgrund der Schärfentiefe ist eine exakte Beurteilung des Fokuspunktes nicht möglich, weswegen eine Messunsicherheit von $s_x = \pm 0,3 \text{ mm}$ angenommen wird.

Die Ergebnisunsicherheit wird grafisch betrachtet und ausgewertet. Die horizontale Bildfeld-

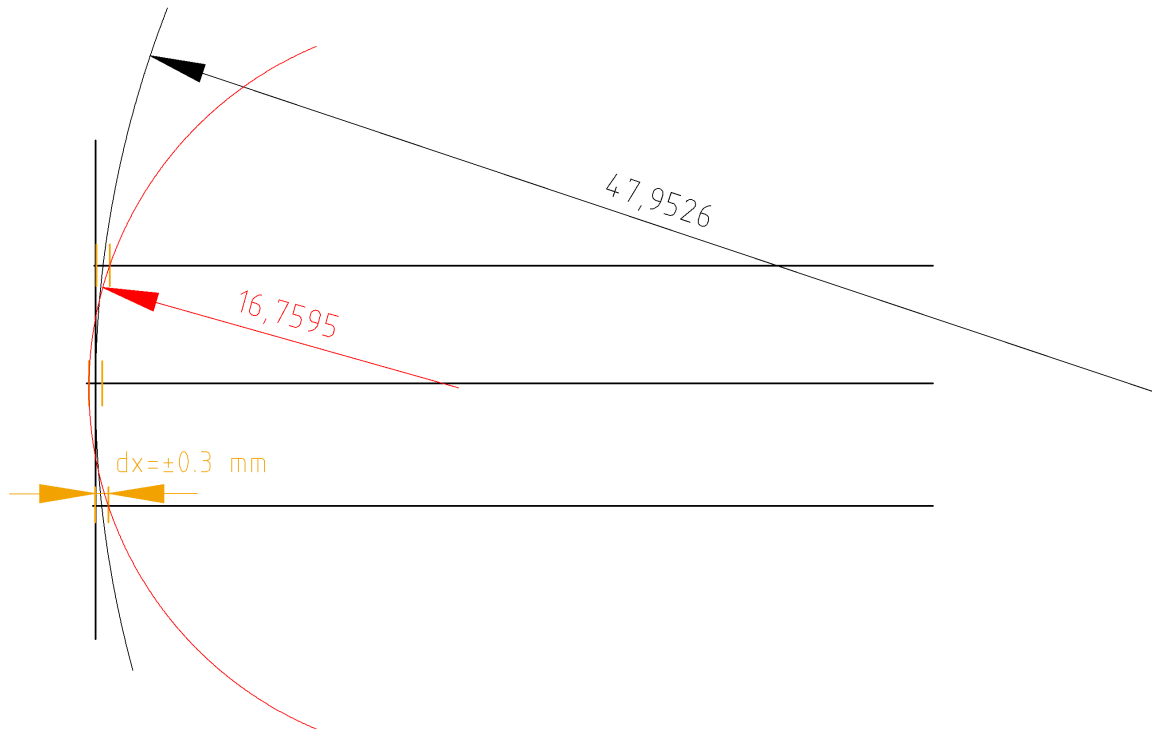


Abbildung 6.6: Betrachtung der Ergebnisunsicherheit des Wölbungsradius der Petzvalfläche

wölbung aus der Grafik 6.5 wird erneut gezeichnet, dieses Mal mit einer Messunsicherheit von $s_x = \pm 0,3$ mm (Abbildung 6.6). In Schwarz ist wieder die ursprünglich berechnete Bildfeldwölbung von $r_p = 47,9526$ mm eingezeichnet. In Rot ist ein Extremfall für maximale Bildfeldwölbung bzw. minimalen Krümmungsradius im Bereich der Messunsicherheit dargestellt. Der Radius nimmt auf $r_p = 16,7595$ mm ab. Im anderen Extremfall kann der Krümmungsradius aber auch gegen unendlich laufen, sodass die Bildebene nicht gekrümmt ist, oder sogar das Vorzeichen wechselt. Grund für die Schwankungen ist ein schlecht konditionierter Versuchsaufbau. Bereits leichte Schwankungen in den Messergebnissen haben große Auswirkungen auf den Krümmungsradius. Als abschließende Beurteilung kann jedoch gesagt werden, dass die Bildfeldwölbung aufgrund einer ausreichenden Schärfentiefe keinen wesentlichen Einfluss auf die Abbildungsqualität hat.

6.3 Versuch: Verzeichnung

Aufbau und Durchführung

Als Target wird hier ein Punktraster mit Durchlichtbeleuchtung verwendet. Das Punkttarget hat einen Punktabstand von 0,500 mm und einen Punktdurchmesser von $(0,250 \pm 0,002)$ mm. Die Genauigkeit der Punktabstände beträgt $\pm 0,001$ mm von Punktmitte zu Punktmitte, aber auch $\pm 0,001$ mm von Gitterkante zu Gitterkante. Die gesamte Mustergröße des Targets beträgt 50 mm \times 50 mm. Dieser Versuch wird mit beiden oben genannten Kameras durchgeführt.

Mit den Kameras werden jeweils Bilder des Punkttargets aufgenommen und aus den Bildern dann die y-z-Koordinaten der Punktmittelpunkte berechnet. Darüber kann dann der Punktabstand im Bild berechnet und die Verzeichnung in Abhängigkeit zur Bildposition dargestellt werden.

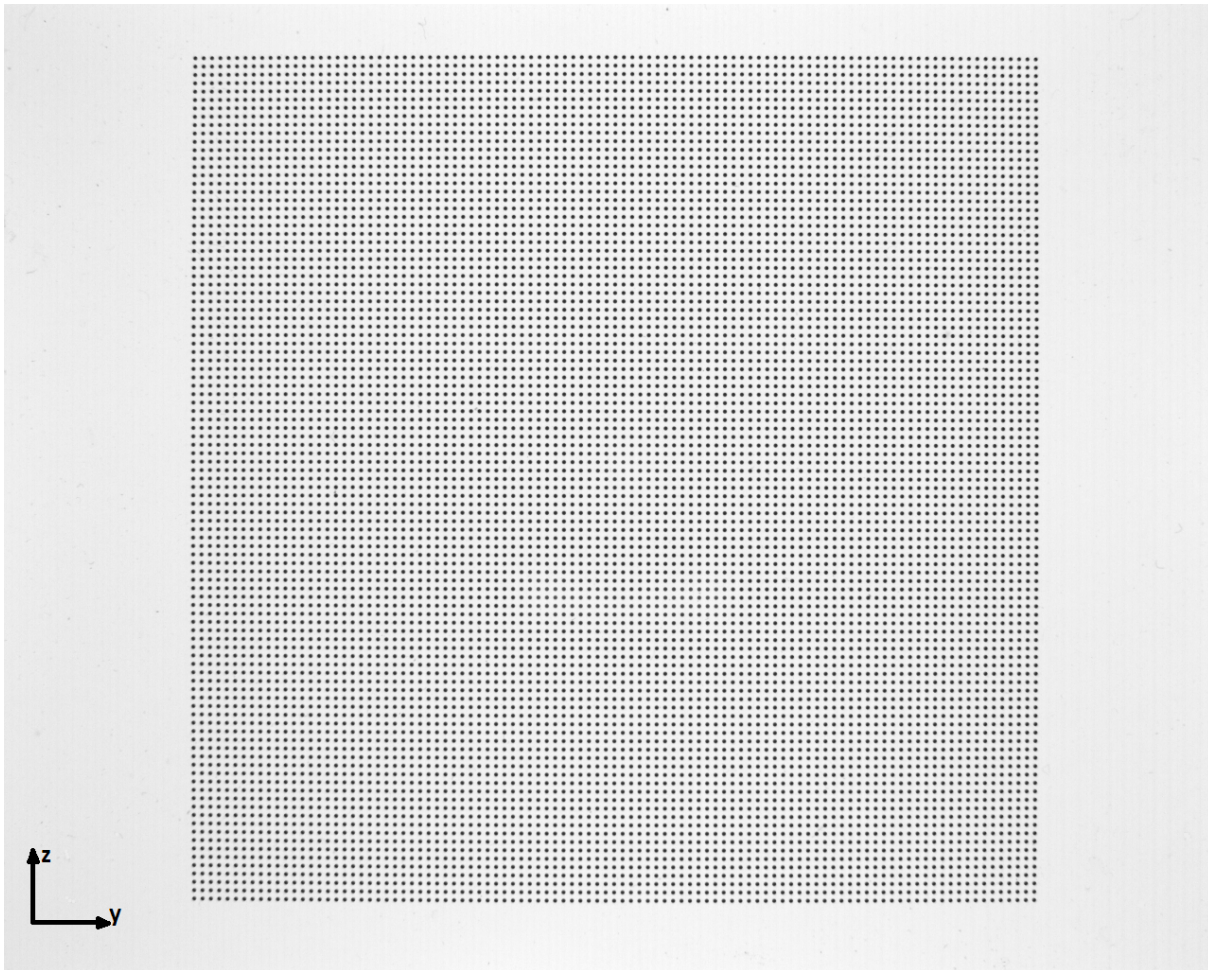


Abbildung 6.7: Verzeichnungstestbild Kamera Ximea MQ013MG-ON

Auswertung

- Kamera Ximea MQ013MG-ON

Die Durchführung liefert ein Bild vom Punkttarget nach Abbildung 6.7. Bei der Kamera Ximea MQ013MG-ON ist das Field of View größer, als die Mustergröße des Targets. Die Verzeichnung der Kamera wird im Folgenden nur für den Bereich gemessen, in dem sich das Punkteraster befindet. Um die Verzeichnung am Rand zu messen, wird entweder ein größeres Punktmuster benötigt, oder das Target muss an die gewünschte Stelle im Bild verschoben werden.

Die y-z Koordinaten der Punkte auf dem Target werden mithilfe der hausinternen Software „Staub revision 145“ ermittelt. Diese sucht aufgrund von Intensitätsunterschieden der einzelnen Pixel zusammenhängende Strukturen, die den Targetpunkten entsprechen. Daraus wird ein intensitätsgewichteter Mittelpunkt berechnet, welcher die Punkteposition im Pixel-Koordinatensystem auf $\pm 0,2$ px genau angibt [16]. Die Messdaten befinden sich im Anhang. In Abbildung 6.8 (a) und 6.8 (b) sind die jeweiligen Abstände der Punkte in horizontaler und vertikaler Richtung dargestellt. Der schwarze Graph stellt dabei jeweils die mittlere Punktereihe aus dem Punkteraster dar. Der blaue Graph ist eine Mittelung aus allen horizontalen bzw. vertikalen Punktreihen. Da sich die horizontale (vertikale) Verzeichnung im Verlauf der Bildhöhe (Bildbreite) augenscheinlich nicht maßgeblich ändert, wird die weitere Auswertung anhand der Mittelungskurve durchgeführt. An die gemittelten Werte wird eine quadratische Funktion angefitet (rot) und de-

ren Funktionsgleichung im Diagramm dargestellt. In Grün ist der Erwartungswert eingezeichnet, bei dem der Abstand bezogen auf den Abbildungsmaßstab aus Kapitel 6.1 unverzerrt dargestellt werden würde. Die Werte der zusätzlichen Achse des Punkteabstandes in Millimeter berechnen sich nach:

$$\Delta y[\text{mm}] = \frac{\Delta y[\text{px}]}{\beta_h} \text{ bzw. } \Delta z[\text{mm}] = \frac{\Delta z[\text{px}]}{\beta_v}$$

In Tabelle 6.2 sind wesentliche Punkte aus den Graphen übersichtlich aufgelistet. Außerdem ist hier zusätzlich die prozentuale Abweichung der Punkte zum unverzerrten Wert von 0,500 mm berechnet.

Tabelle 6.2: Verzeichnung der Kamera Ximea MQ013MG-ON

| | Bildposition | Punkteab- stand [px] | Punkteab- stand [mm] | Prozentuale Abweichung |
|-----------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Horizontale Verzeichnung | Bildmitte ($y = 640 \text{ px}$) | 8,938 | 0,515 | 3,0 % |
| | Rand von Punktmuster ($y = 200 \text{ px}$) | 8,832 | 0,508 | 1,6 % |
| Vertikale Verzeichnung | Bildmitte ($z = 512 \text{ px}$) | 8,937 | 0,515 | 3,0 % |
| | Rand von Punktmuster ($z = 85 \text{ px}$) | 8,836 | 0,509 | 1,8 % |

Mit der Fehlerrechnung nach Gauß ergibt sich für die Ergebnisunsicherheit des Punkteabstandes in Pixeln:

$$s_{\Delta y}[\text{px}] = \sqrt{s_{y1}^2 + s_{y2}^2} = \sqrt{(0,2 \text{ px})^2 + (0,2 \text{ px})^2} = 0,28 \text{ px} = s_{\Delta z}[\text{px}]$$

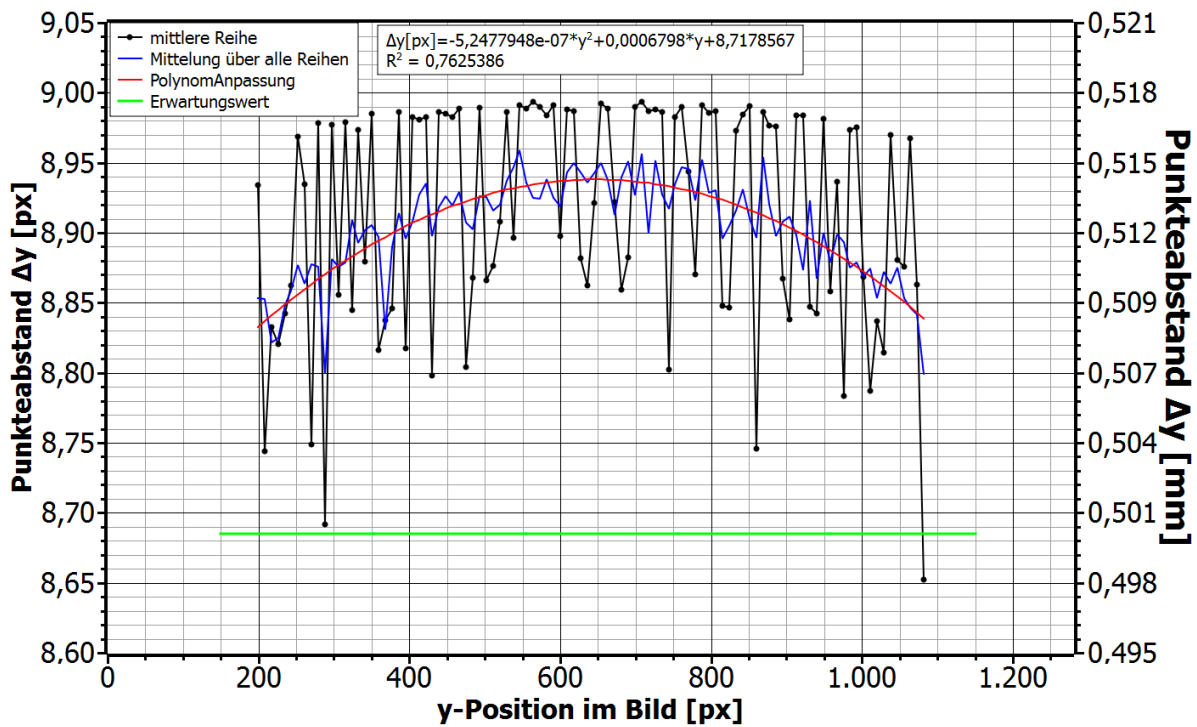
Für die Unsicherheit in Millimetern der horizontalen Verzeichnung ergibt sich:

$$s_{\Delta y}[\text{mm}] = \sqrt{2 * \left(\frac{s_y}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta y}{\beta_h^2} * s_{\beta_h}\right)^2}$$

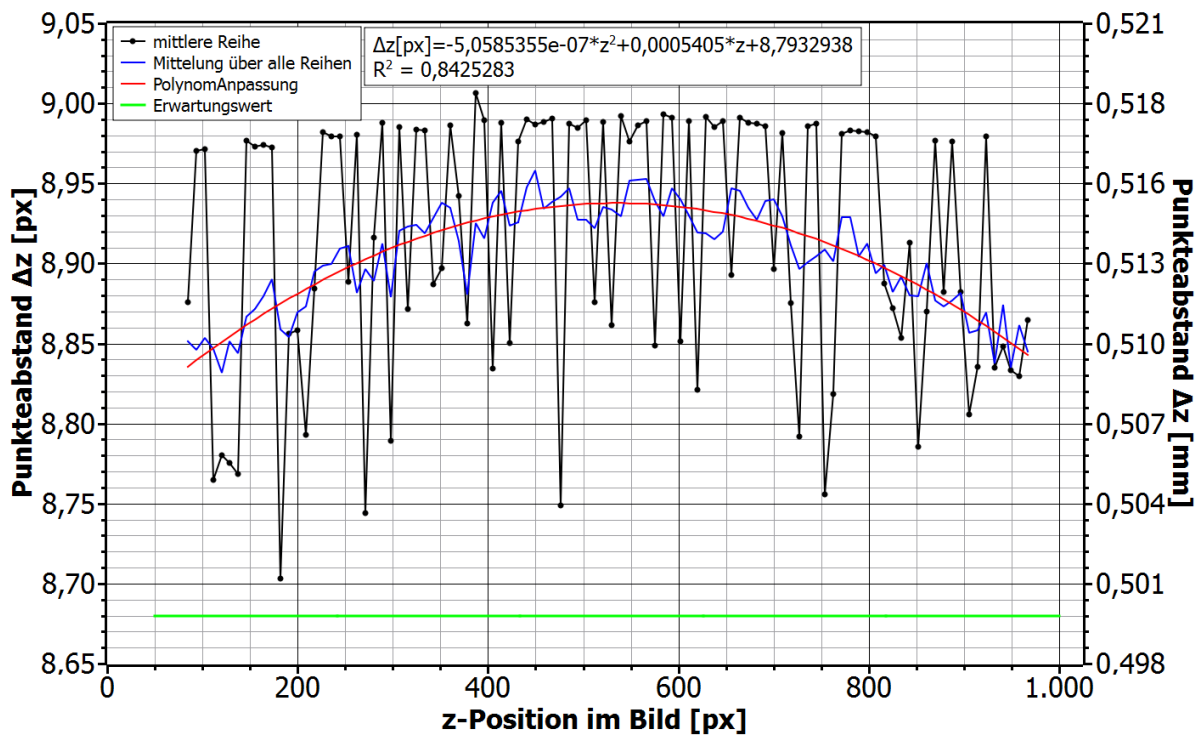
Bei der vertikalen Verzeichnung in Millimetern ist die Unsicherheit:

$$s_{\Delta z}[\text{mm}] = \sqrt{2 * \left(\frac{s_z}{\beta_v}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta z}{\beta_v^2} * s_{\beta_v}\right)^2}$$

Je nach Punkteabstand ist die Ergebnisunsicherheit in Millimetern für die horizontale und vertikale Verzeichnung in etwa $s_{\Delta y} \approx s_{\Delta z} \approx 16 \mu\text{m}$. Durch Mittelung über mehrere Punktereihen wie in Tabelle 6.2 wird die Unsicherheit weiter verringert.



(a) Horizontale Verzeichnung Kamera Ximea MQ013MG-ON



(b) Vertikale Verzeichnung Kamera Ximea MQ013MG-ON

Abbildung 6.8: Plot der Verzeichnung von Kamera Ximea MQ013MG-ON

- Kamera Ximea MQ042MG-CM

Mit der Kamera Ximea MQ042MG-CM werden aufgrund des kleineren Field of Views deutlich weniger Punkte aufgezeichnet. In Abbildung 6.9 ist die Aufnahme zu sehen, welche bereits mit den berechneten Punktkoordinaten überlagert ist. Der Abstand der Punkte in Abhängigkeit zur Bildposition ist dann in Abbildung 6.10 (a) für die horizontale Verzeichnung und in Abbildung 6.10 (b) für die vertikale Verzeichnung dargestellt. Die schwarze Kurve ist dabei jeweils der Punkteabstand der mittleren beiden Reihen. Die blaue Kurve ist die Mittelung aus allen horizontalen, bzw. vertikalen Linien. Die quadratische Fitkurve in Rot ist an die blaue Kurve angefitet. Der unverzerrte und theoretisch zu erwartende Wert für den Punkteabstand beträgt hier $\Delta y = \Delta z = 93 \text{ px}$ und liegt somit außerhalb des, in der Grafik dargestellten, Bereichs. Die Werte der zusätzlichen Achse des Punkteabstandes in Millimeter berechnen sich nach:

$$\Delta y[\text{mm}] = \frac{\Delta y[\text{px}]}{\beta_h} \text{ bzw. } \Delta z[\text{mm}] = \frac{\Delta z[\text{px}]}{\beta_v}$$

Tabelle 6.3 zeigt wesentliche Werte aus den Graphen von Abbildung 6.10 (a) und 6.10 (b). Die prozentuale Abweichung bezieht sich wieder auf den unverzerrten Punkteabstand von 0,500 mm.

Tabelle 6.3: Verzeichnung der Kamera Ximea MQ042MG-CM

| | Bildposition | Punkteab- stand [px] | Punkteab- stand [mm] | Prozentuale Abweichung |
|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Horizontale Verzeichnung | Bildmitte ($y = 1024 \text{ px}$) | 92,078 | 0,4950 | 1,0 % |
| | Bildrand links ($y = 0 \text{ px}$) | 92,222 | 0,4958 | 0,84 % |
| | Bildrand rechts ($y = 2048 \text{ px}$) | 92,319 | 0,4963 | 0,74 % |
| Vertikale Verzeichnung | Bildmitte ($z = 1024 \text{ px}$) | 92,161 | 0,49548 | 0,90 % |
| | Bildrand links ($z = 0 \text{ px}$) | 92,357 | 0,4965 | 0,70 % |
| | Bildrand rechts ($z = 2048 \text{ px}$) | 92,182 | 0,4956 | 0,88 % |

Die Position der Pixel wird auch hier mit der Software auf eine Genauigkeit von $\pm 0,2 \text{ mm}$ berechnet. Die Fehlerrechnung nach Gauß ergibt somit eine Ergebnisunsicherheit des Punkteabstandes in Pixeln von:

$$s_{\Delta y}[\text{px}] = \sqrt{s_{y1}^2 + s_{y2}^2} = \sqrt{(0,2 \text{ px})^2 + (0,2 \text{ px})^2} = 0,28 \text{ px} = s_{\Delta z}[\text{px}]$$

Für die Unsicherheit in Millimetern der horizontalen Verzeichnung ergibt sich:

$$s_{\Delta y}[\text{mm}] = \sqrt{2 * \left(\frac{s_y}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta y}{\beta_h^2} * s_{\beta_v}\right)^2}$$

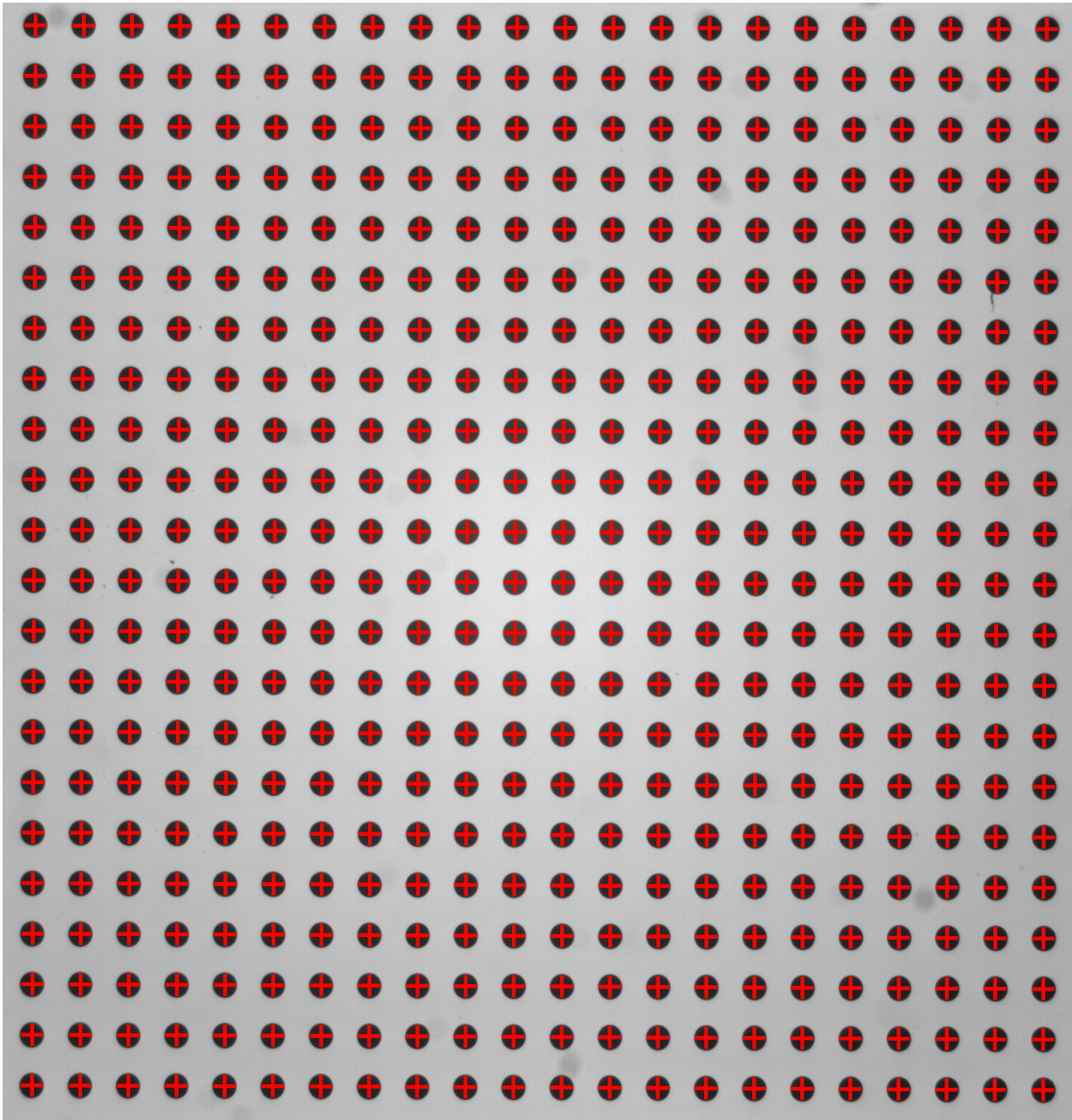
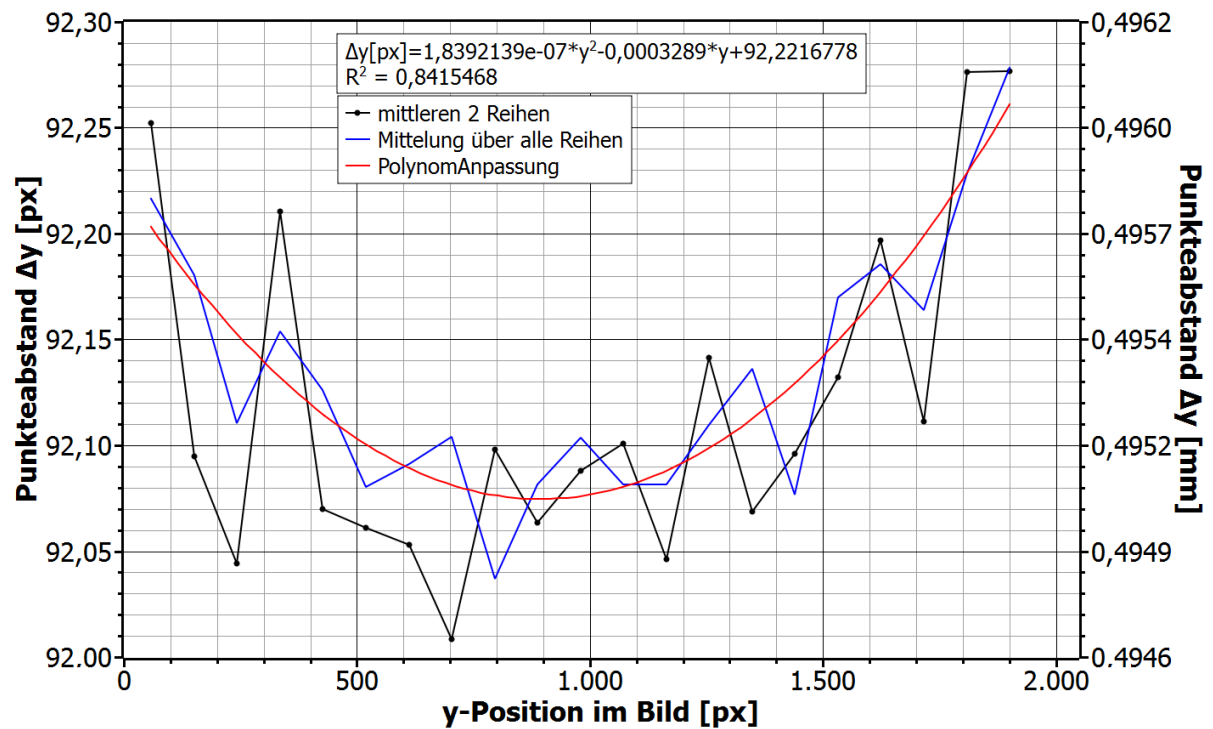
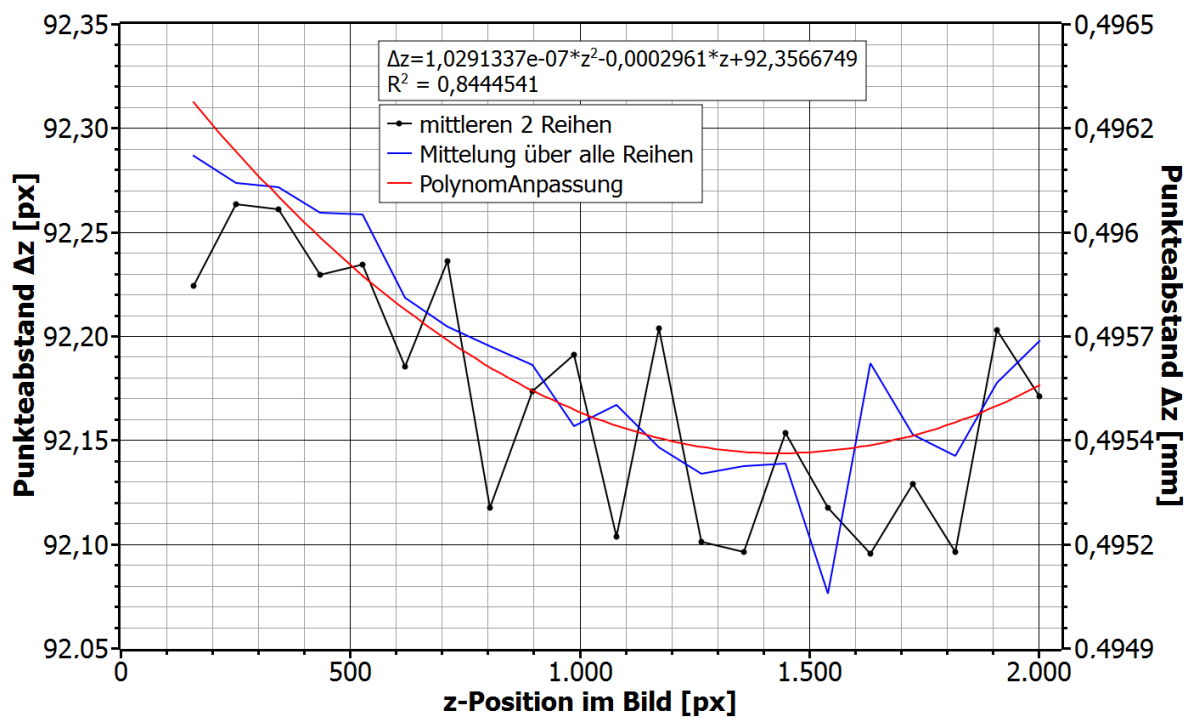


Abbildung 6.9: Verzeichnungstestbild Kamera Ximea MQ042MG-CM



(a) Horizontale Verzeichnung Kamera Ximea MQ042MG-CM



(b) Vertikale Verzeichnung Kamera Ximea MQ042MG-CM

Abbildung 6.10: Plot der Verzeichnung von Kamera Ximea MQ042MG-CM

Bei der vertikalen Verzeichnung in Millimetern gilt für die Unsicherheit:

$$s_{\Delta z}[mm] = \sqrt{2 * \left(\frac{s_z}{\beta_v}\right)^2 + \left(\frac{-\Delta z}{\beta_v^2} * s_{\beta_h}\right)^2}$$

Je nach Punkteabstand ist die Ergebnisunsicherheit in Millimetern für die horizontale und vertikale Verzeichnung in etwa $s_{\Delta y} \approx s_{\Delta z} \approx 13 \mu m$. Durch Mittelung über mehrere Punktereihen wie in Tabelle 6.3 wird die Unsicherheit nochmal geringer.

Diskussion

Bei beiden Kameras ist die horizontale Verzeichnung etwa gleich stark, wie die vertikale. Die Kamera Ximea MQ013MG-ON bildet die Punktabstände größer ab, als im Original. Die Bildmitte ist dabei stärker verzerrt als der Bildrand, woraus sich eine tonnenförmige Verzeichnung mit Abweichungen von bis zu 3,0 % vom unverzerrten Wert ergibt. Die Bildfeldwölbung der Kamera Ximea MQ042MG-CM ist hingegen genau andersrum gerichtet. Zwar ist auch hier die Bildmitte stärker verzerrt, wie der Bildrand, jedoch sind die Abstände kleiner als der Erwartungswert. Es ergibt sich eine kissenförmige Verzeichnung mit Abweichungen von bis zu 1,0 % vom Original. Bei der Kamera Ximea MQ042MG-CM ist außerdem deutlich eine exzentrische Verzeichnung zu erkennen. Vor allem bei der vertikalen Kurve liegt das Minimum der Kurve nicht in der Bildmitte. In der Tabelle 6.3 ist somit der Wert der Verzeichnung vom linken und rechten Bildrand getrennt dargestellt.

7 Diskussion und Ausblick

Der Kalibrier- und Prüfstand in dieser Arbeit wurde anhand der Anforderungen im Projekt EKoPlasma entworfen und aufgebaut. Die modulare Bauweise ermöglicht eine ständige Weiterentwicklung des Prüfstandes. Dadurch bleibt dieser auch für zukünftige Forschungsprojekte einsatzfähig. Die Positionierung der Bauteile erfolgt mit der Präzision optischer Systeme. Außerdem sind alle Komponenten mit möglichst wenig Spiel montiert. Bei der Durchführung der Experimente ist aufgefallen, dass der z-Hub des Kamerastisches von $\Delta z = 44,5$ mm sehr knapp ausgelegt ist. Um dem entgegenzuwirken, ist im Prüfstand das Targetmuster ebenfalls grob höhenverstellbar. Ist jedoch ein großer Verstellweg mit hoher Präzision in z-Richtung notwendig, muss möglicherweise in den Prüfstand ein Hubtisch mit größerem Hubweg integriert werden. Der Fahrweg in x- und y-Richtung ist zum jetzigen Zeitpunkt durchaus ausreichend.

Ebenfalls hat sich in den Versuchen gezeigt, dass es durchaus sinnvoll ist, als zusätzliche Beleuchtungsart eine Auflichtbeleuchtung in den Prüfstand zu integrieren (Versuch Bildfeldwölbung, Kapitel 6.1). Dadurch ist es möglich schnell und vor allem auch kostengünstig neue Targetmuster zu testen, aber auch große Targetdimensionen zu beleuchten. Mit der im Versuch verwendeten Auflichtbeleuchtung wurde keine homogene Ausleuchtung der Targetoberfläche erreicht. Für einfache Versuche wie dem Field of View ist das jedoch nicht zwingend erforderlich. Für empfindlichere Versuche, in denen eine homogene Auflichtbeleuchtung benötigt wird, muss die Lampenposition und Lampenart angepasst werden. Eine Möglichkeit stellt die beschriebene Ringlichtbeleuchtung aus Kapitel 4.3 dar. Bei der im Prüfstand hauptsächlich integrierten Durchlichtbeleuchtung hingegen, sind keine Intensitätsunterschiede erkennbar. Auch ein Flackern der Helligkeit wurde erfolgreich vermieden.

Die Auswertung der Versuche zu Abbildungsfehlern ist bisher händisch erfolgt. Bei routinemäßiger Vermessung bestimmter Abbildungsfehler und immer wieder folgenden Versuchsauswertungen ist es sinnvoll, für die Auswertung geeignete Software zu programmieren. Da die Anforderungen bisher noch nicht konkret gefasst sind, ist das nicht Teil der Arbeit.

Des Weiteren kann in Zukunft eine zweite Schiene parallel zur optischen Achse integriert werden, auf der Laserstrahlsysteme unabhängig von den Kamerasystemen kalibriert werden können. Die Targetebene kann um 45° in Richtung der zweiten Schiene gedreht werden, sodass auf der Targetoberfläche der aufgefächerte Laserstrahl sichtbar wird und beurteilt werden kann, eventuell auch mithilfe von Kameras.

Die Genauigkeit der Versuchsergebnisse hängt stark von der Versuchsdurchführung und der Targetgenauigkeit ab. Die Achsen im Versuch können auf $\pm 10 \mu\text{m}$ genau positioniert werden. Damit ist die geforderte Auflösung von kleiner gleich $12 \mu\text{m}$ gegeben. Beim Versuch Field of View hat das Target nur eine Auflösung von 1 mm. Für genauere Versuchsergebnisse ist hier eine höhere Auflösung erforderlich. Bei der Bildfeldwölbung sind die Versuchsbedingungen schlecht konditioniert, wodurch eine exakte Bestimmung nicht möglich ist. Beim Versuch Verzeichnung berechnet die Software die Punktposition auf 0,2 px genau. Je nach Abbildungsmaßstab ergeben sich dadurch Positionsgenauigkeiten von wenigen Mikrometern. Durch Mittelwertbildung kann die Genauigkeit noch weiter erhöht werden. Die geforderte Genauigkeit wurde somit erreicht.

Literaturverzeichnis

- [1] K. Egginger, C. Knappek, S. Khrapak, V. Nosenko, M. Pustynnik, C. R  th, M. Rubin-Zuzic und H. Thomas. "Research Group on Complex Plasmas". In: *Status Report 1* (Dez. 2015).
- [2] H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher und D. M  hlmann. "Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma". In: *Phys. Rev. Lett.* 73 (5 Aug. 1994), S. 652–655. DOI: 10.1103/PhysRevLett.73.652.
- [3] H. Yasuaki und T. Kunihide. "Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma". In: *Japanese Journal of Applied Physics* 33.6A (1994), S. L804.
- [4] J. H. Chu und L. I. "Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas". In: *Phys. Rev. Lett.* 72 (25 Juni 1994), S. 4009–4012. DOI: 10.1103/PhysRevLett.72.4009.
- [5] *PlasmaLab/EKoPlasma*. 1.02.2017. URL: <http://complex-plasmas.dlr.de/index.php/plasmalab>.
- [6] J. Maier. *Physikskript PHB3/4(Schwingungen, Wellen, Optik)*. Hochschule München, 2014.
- [7] DIN1335. *Geometrische Optik - Bezeichnungen und Definitionen*. Beuth, Dez. 2003.
- [8] P. A. Tipler, G. Mosca und J. Wagner. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Auflage. Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-642-54165-0.
- [9] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch und H. Schmidt. *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. 4. Auflage. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-73471-0.
- [10] R. Kingslake und B. R. Johnson. *Lens design fundamentals*. academic press, 2009. ISBN: 978-0123743015.
- [11] G. D. Boreman. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. Bd. TT52. Spie Press Book, 2001. ISBN: 978-0-81-944143-0.
- [12] ThorLabs. *Custom Enclosures Designed by Thorlabs*. 28.02.2017. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=45.
- [13] STEMMER IMAGING. *Das Handbuch der Bildverarbeitung*. 3. Auflage. 2016/17. ISBN: 978-3-00-051331-2. URL: www.stemmer-imaging.com.
- [14] Edmund Optics. *3"x 3"Positiv, USAF Aufl  sungstestbild*. 7.03.2017. URL: <https://www.edmundoptics.de/images/catalog/6033.gif>.
- [15] Image Engineering. *Sector Star With Corner Line Pairs TE133*. 7.03.2017. URL: <https://www.image-engineering.de/content/products/charts/te133/images/TE133.jpg>.
- [16] D. P. Mohr, C. A. Knappek, P. Huber und E. Zähringer. "Particle Detection Algorithms for Complex Plasmas". wird noch veröffentlicht. 2016. URL: <http://elib.dlr.de/110443/>.

A Versuchsprotokoll Bildfeldwölbung

Versuchsprotokoll: Bildfeldwölbung

Datum: 14.03.2017 Ort: Oberpfaffenhofen, DLR Experimentator: Janeke Möller

Kamera: Ximea
MQ042MG-CM

Kameraparameter:

Blende 6

Exposure time: 400014 µs

Image size: 2048 x 2048 px

gain: 0,0 dB

offset x: 0px

offset y: 0px

chip-temp: 28,44°C

Fokuspunkt: Maximale Modulation bei einer Ortsfrequenz von 36 LP/mm:

0,16 in horizontaler Richtung

0,16 in vertikaler Richtung

Messunsicherheit: $s_x = \pm 0,3 \text{ mm}$ $s_y = \pm 0,01 \text{ mm}$ $s_z = \pm 0,01 \text{ mm}$

- Bildfeldwölbung in horizontaler Richtung: verwendete MTF: vertikal -Richtung

Linker Bildrand $\Delta x_1 = -0,34 \text{ mm}$

$\Delta y_1 = 5,34 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix}$$

Rechter Bildrand $\Delta x_2 = -0,28 \text{ mm}$

$\Delta y_2 = -5,56 \text{ mm}$

- Bildfeldwölbung in vertikaler Richtung: verwendete MTF: vertikal -Richtung

Oberer Bildrand $\Delta x_1 = -0,41 \text{ mm}$

$\Delta z_1 = -5,64 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta z_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix}$$

Untere Bildrand $\Delta x_2 = -0,16 \text{ mm}$

$\Delta z_2 = 5,48 \text{ mm}$

- Bildfeldwölbung quer von links oben nach rechts unten: verwendete MTF: vertikal -Richtung

Links oben $\Delta x_1 = -0,59 \text{ mm}$

$\Delta y_1 = +5,41 \text{ mm}$

$\Delta z_1 = -5,65 \text{ mm}$

$\Delta x_2 = -0,38 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta z_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix}$$

Rechts unten

$\Delta y_2 = -5,42 \text{ mm}$

$\Delta z_2 = 5,48 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta z_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix}$$

- Bildfeldwölbung quer von links unten nach rechts oben: verwendete MTF: vertikal -Richtung

Links unten $\Delta x_1 = -0,36 \text{ mm}$

$\Delta y_1 = +5,45 \text{ mm}$

$\Delta z_1 = 5,47 \text{ mm}$

$\Delta x_2 = -0,30 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta z_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix}$$

Rechts oben

$\Delta y_2 = -5,49 \text{ mm}$

$\Delta z_2 = -5,64 \text{ mm}$

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta z_1 \end{pmatrix}$$

$$\vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix}$$

B Technische Zeichnungen und Datenblätter

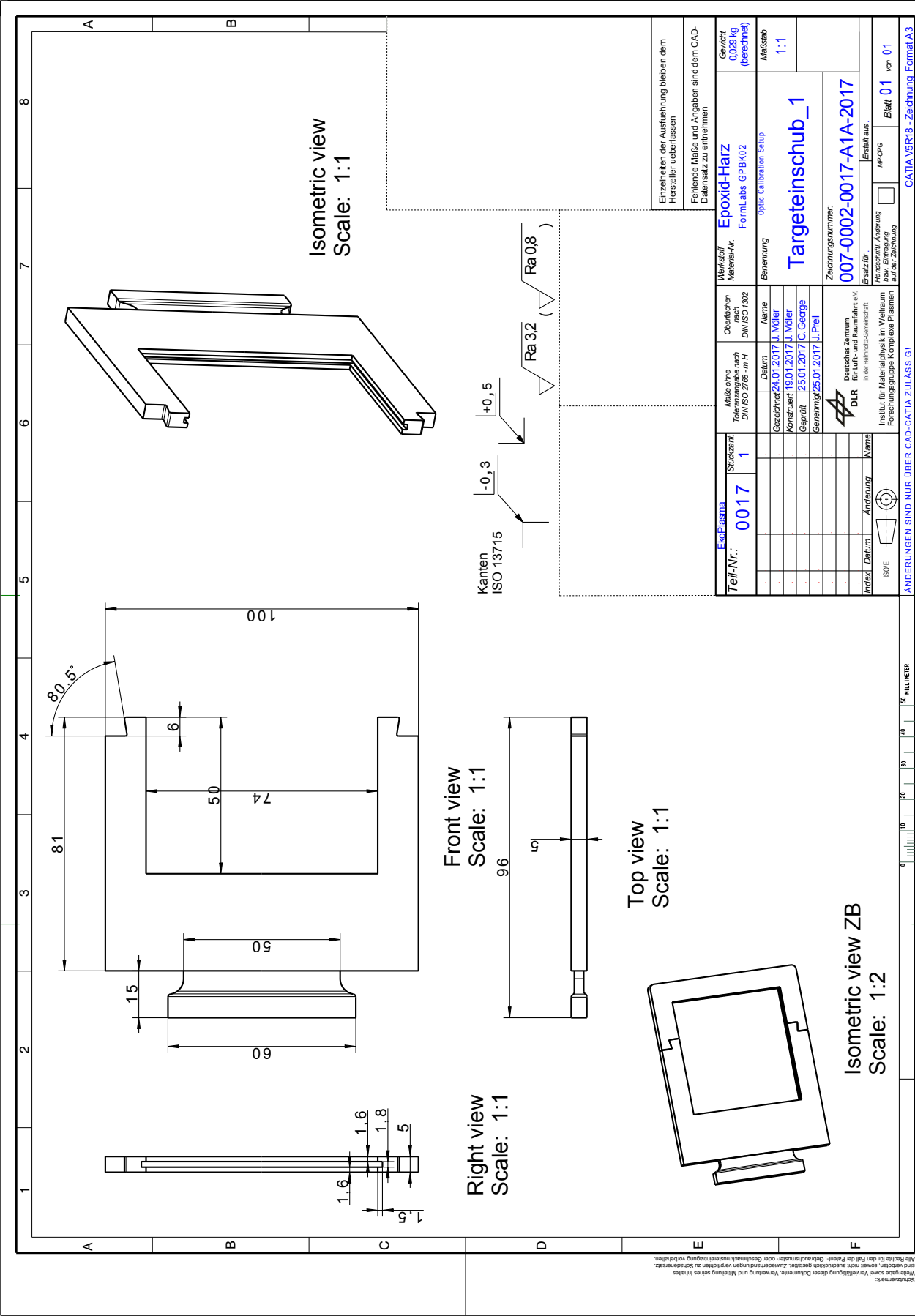
Technische Zeichnungen

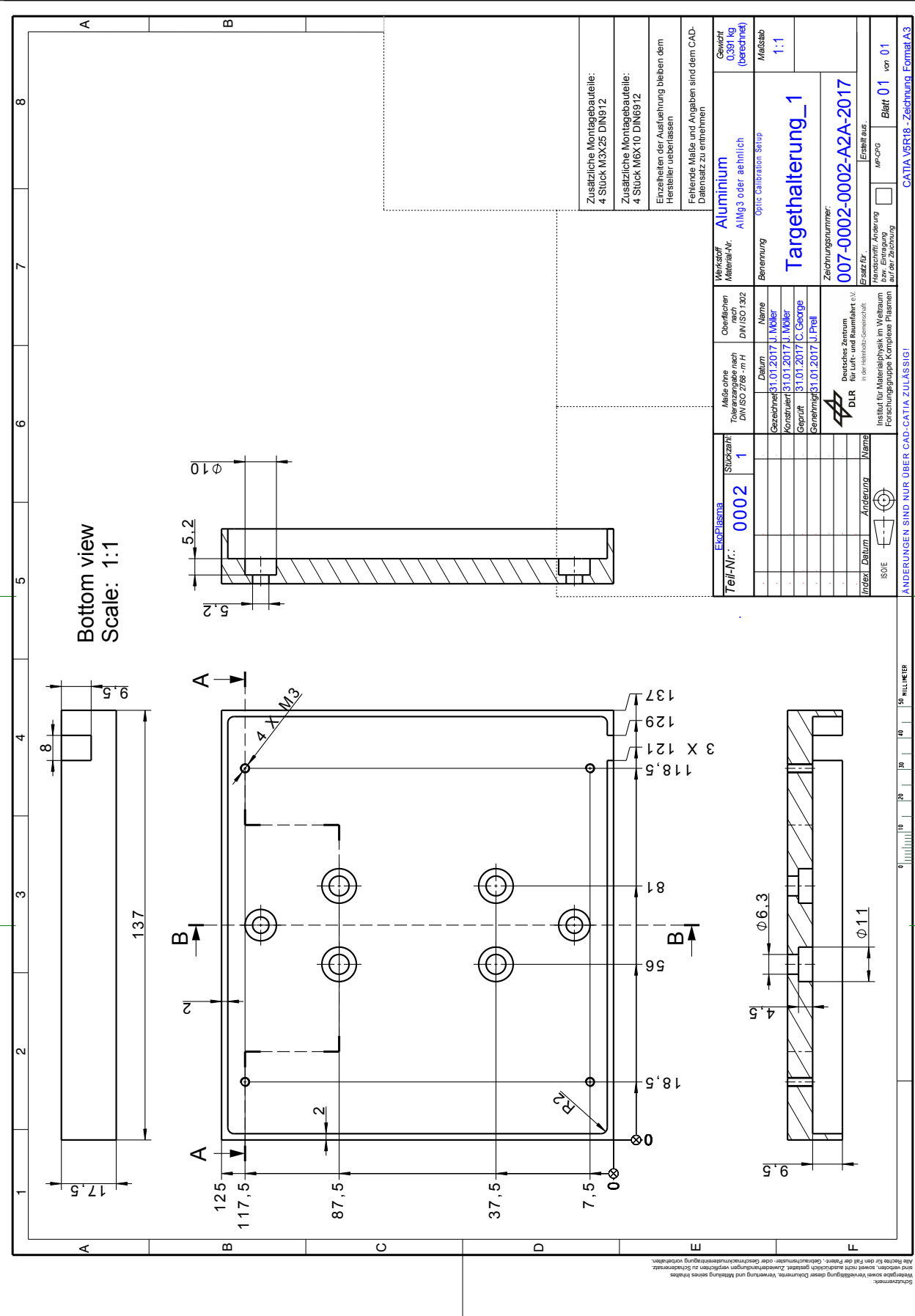
- 1 Targetrahmen 1
- 2 Targetrahmen 2
- 3 Targethalterung 1 Lampeneinfassung
- 4 Targethalterung 2 Mittelteil
- 5 Targethalterung 3 Deckplatte
- 6 Adapter Profilstange - Schlitten
- 7 Winkel Kabeldurchführung

Datenblätter

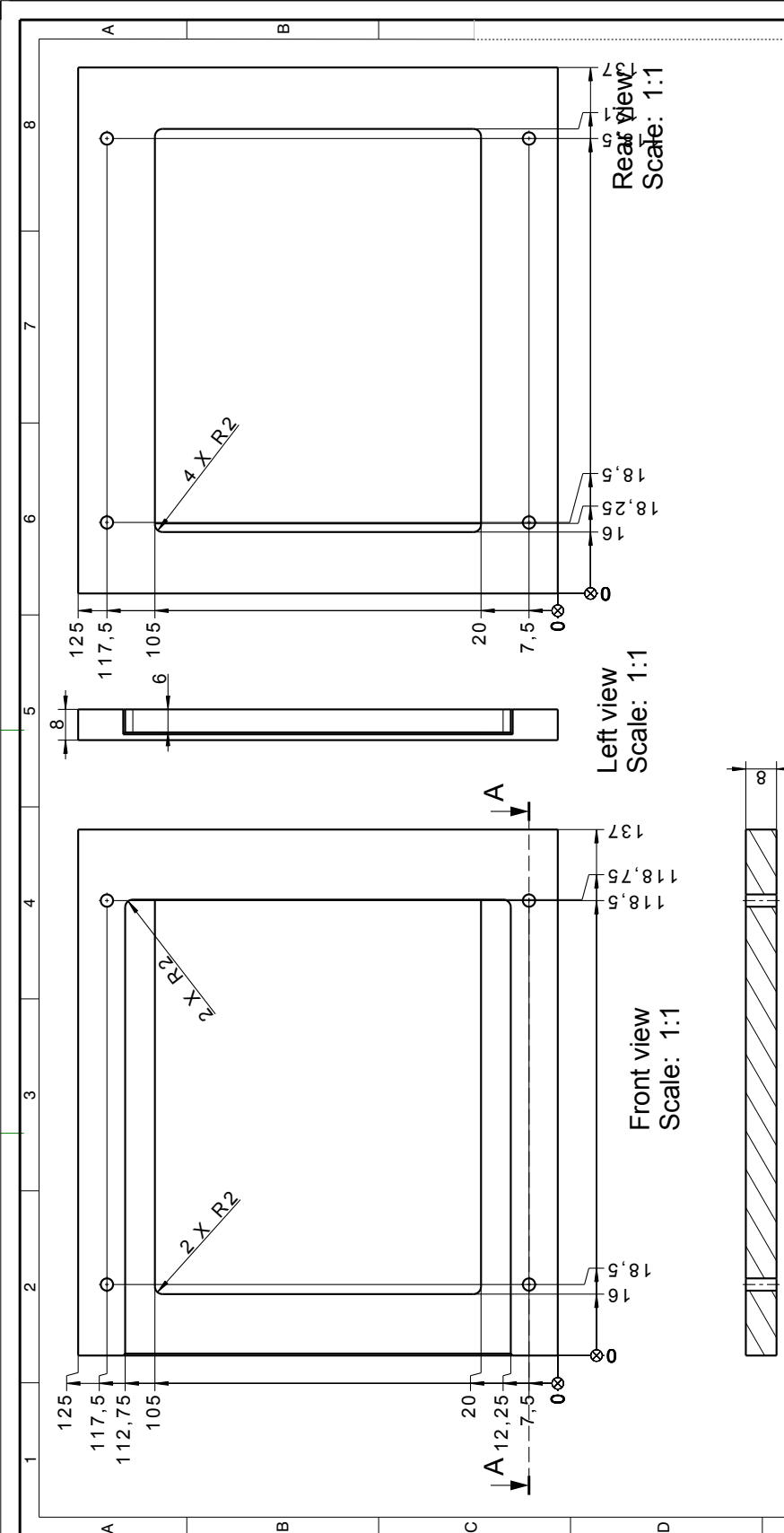
Hier befinden sich die, in den Versuchen verwendeten Datenblätter. Weitere Datenblätter der im Aufbau verwendeten Bauteile, sowie eine dazugehörige Stückliste, sind unter Anhang C auf CD zu finden.

- 8 Kamera Ximea MQ013MG-ON
- 9 Kamera Ximea MQ042MG-CM
- 10 Objektiv Pentax C1614-M
- 11 Target USAF 1951
- 12 Target Punktraster





Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Dokumente, Verwertung und Mitteilung seines Inhaltes, Schutzvermerk:
sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zweifelsbefragungen verpflichten zu Schadensersatz.
Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustererfindung vorbehalten.



| | | | | | |
|---|--|---|--|--|--|
| Einzelheiten der Ausführung bleiben dem Hersteller überlassen | | Fehlende Maße und Angaben sind dem CAD-Datensatz zu entnehmen | | Gewicht 0,128 kg (berechnet) | |
| Aluminium | | AIMg3 oder ähnlich | | Maßstab 1:1 | |
| Material-Nr. | | Benennung | | Optic Calibration Setup | |
| Oberflächen nach DIN ISO 302 | | Name | | Targethalterung_2 | |
| Maße ohne Toleranzangabe nach DIN ISO 2768-mS | | Datum | | Zeichnungsnummer: | |
| Gezeichnet 31.01.2017 J. Möller | | Konstruiert 31.01.2017 J. Möller | | 007-0002-0003-A2A-2017 | |
| Geprüft 31.01.2017 C. George | | Genehmigt 31.01.2017 J. Pfaff | | Erstellt aus | |
| Index | | Datum | | Blatt 01 von 01 | |
| Änderung | | Name | | Me-CNC | |
| ISOE | | Änderung | | CATIA V5R18 - Zeichnung Format A3 | |
| Änderungen sind nur über CAD-CATIA zulässig! | | Änderungen sind nur über CAD-CATIA zulässig! | | Änderungen sind nur über CAD-CATIA zulässig! | |

Schneidmarken:
Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmackschutzrechte vorbehalten.
Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Dokumente, Verwertung und Mitteilung seines Inhaltes ist verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz.
Vorlage ist Eigentum der DLR. Nachdruck ist ohne schriftliche Genehmigung des DLR nicht zulässig.

3.5.3. MQ013xG-ON (VITA1300)

3.5.3.1. Sensor and camera parameters

| xiQ model | | MQ013CG-ON | | MQ013MG-ON | |
|----------------------------------|------------------------|---|-------------|------------------|--------|
| Sensor parameter (*1) | | | | | |
| Brand | | NOIV1SE1300A-QDC | | NOIV1SN1300A-QDC | |
| Color filter | | RGB Bayer mosaic | | None | |
| Type | | Global shutter, overlap mode | | | |
| Pixel Resolution (H × V) | [pixel] | 1280 × 1024, usable in color mode: 1264 x 1016 | | | |
| Active area size (H × V) | [mm] | 6.18 × 4.95 | | | |
| Sensor diagonal | [mm] | 7.9 | | | |
| Optical format | [inch] | 1/2 | | | |
| Pixel Size (H × V) | [μm] | 4.8 × 4.8 | | | |
| ADC resolution | [bit] | 10, 8 | | | |
| FWC | [ke-] | 13.7 | | | |
| Dynamic range | [dB] | >53 | | | |
| SNR Max | [dB] | 41 | | | |
| Dark noise | [e-] | 30: 2.2 LSB ₁₀ | | | |
| Dark current | [e-/s] | 4.5 (25°C) | | | |
| DSNU | [LSB ₁₀ /s] | 0.33 | | | |
| Sensitivity | [V/(Lux s)] | 4.6 | | | |
| Camera parameters | | | | | |
| Digitization | [bit] | 10 | | | |
| Supported bit resolutions | [bit/pixel] | 8, 10 | | | |
| Exposure time (EXP) | | 74μs to 1sec in steps of 1μs if exp < 65.54ms; 4μs if exp<262.1ms; 16μs otherwise | | | |
| Variable Gain Range (VGA) | [dB] | 12 | | | |
| Refresh rate (MRR) | [fps] | 150 | | | |
| Supported standard readout modes | | Binning/skipping | pixels | fps | Bit/px |
| 0 | | 1x1 | 1280 × 1024 | 150 | 8 |
| 1 | | 1x1 | 1280 × 1024 | 145 | 10 |
| 2 | | 2x2 | 640 x 512 | 500 | 8 |
| 3 | | 2x2 | 640 x 512 | 288 | 10 |
| Power consumption | | | | | |
| typical | [W] | 1.3 | | | |
| Maximum | [W] | 1.4 | | | |
| Mechanical | | | | | |
| height | [mm] | 26.4 | | | |
| width | [mm] | 26.4 | | | |
| depth | [mm] | 26.2 (with C/CS Mount module B) 21.2 (without C/CS Mount module B) | | | |
| weight | [g] | 26.9 (with C/CS Mount module B) 22.9 (without C/CS Mount module B) 4.3 (board level camera) | | | |

table 3-11, MQ013xG-ON, sensor and camera parameters

3.5.3.2. Quantum efficiency curves [%]

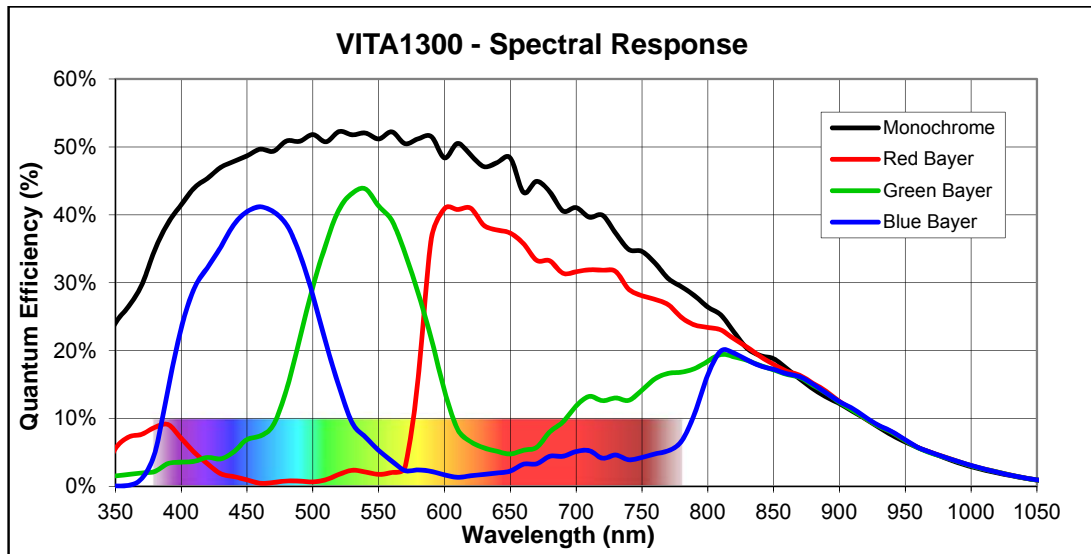


figure 3-12 VITA1300 mono and color, quantum efficiency curves, ©Onsemi

3.5.3.3. Mechanical drawings (C-mount [with C/CS mount module B])

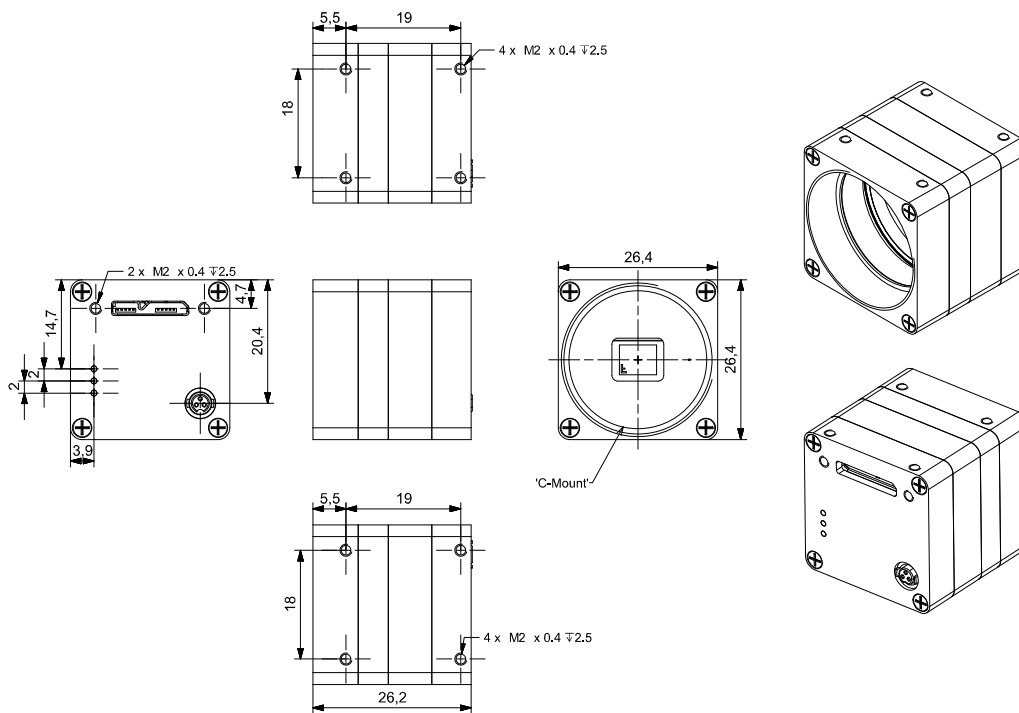


figure 3-13, mechanical drawing MQ013xG-ON, C-Mount housing

3.5.3.4. Mechanical drawings (CS-mount [without C/CS mount module B])

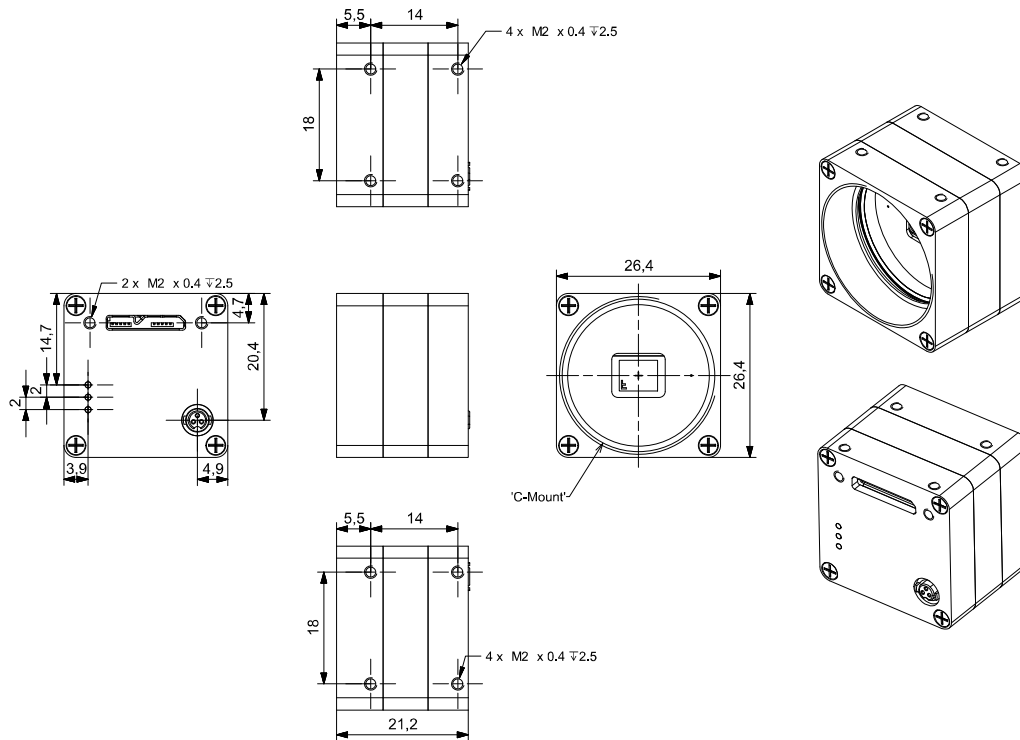


figure 3-14, mechanical drawing MQ013xG-ON, CS-Mount housing

3.5.3.5. Camera orientation

Please note that the camera orientation of the MQ013xG-ON models are different. The USB 3.0 connector is at the upper side of the camera. Please see the next figure:

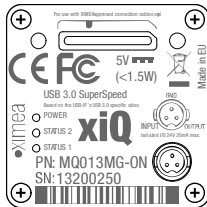


Figure 3-15, MQ013xG-ON, camera orientation

3.5.3.6. Referenced documents

Onsemi Datasheet VITA1300-datasheet-Rev. 8 (July 2012)

3.5.3.7. Sensor features

| feature | Note |
|------------|---|
| Binning | Not implemented |
| Skipping | Yes, 2x2 skipping supported |
| ROI | 1 ROI with free parameters supported (x coordinates multiple of 16, y coordinates multiple of 2) |
| HW Trigger | Trigger with overlap usable (see 4.3.2.4 Triggered mode with overlap) |
| HDR | Knee point based HDR (beta stage), see 4.4.9 HDR – Not implemented, yet |

table 3-12, sensor features available

3.5.6. MQ042xG-CM

3.5.6.1. Sensor and camera parameters

| xiQ model | | MQ042CG-CM | MQ042MG-CM | MQ042RG-CM | |
|----------------------------------|------------------------|---|-------------------|--------------------|--------|
| Sensor parameter (*1) | | | | | |
| Brand | | CMV4000ES-3E5C1PP | CMV4000ES-3E5M1PP | CMV4000ES-3E12M1PP | |
| Color filter | | RGB Bayer mosaic | None | None | |
| Type | | Global shutter, overlap mode | | | |
| Pixel Resolution (H × V) | [pixel] | 2048 × 2048, usable in color mode: 2040 x 2040 | | | |
| Active area size (H × V) | [mm] | 11.27 × 11.27 | | | |
| Sensor diagonal | [mm] | 15.9 | | | |
| Optical format | [inch] | 1 | | | |
| Pixel Size (H × V) | [μm] | 5.5 × 5.5 | | | |
| ADC resolution | [bit] | 10 | | | |
| FWC | [ke-] | 13.5 | | | |
| Dynamic range | [dB] | 60 | | | |
| SNR Max | [dB] | 41 | | | |
| Dark noise | [e-] | 13 (RMS) | | | |
| Dark current | [e-/s] | 125 (25°C) | | | |
| DSNU | [LSB ₁₀ /s] | 3 | | | |
| Sensitivity | [V/(Lux s)] | 4.64 | | | |
| Camera parameters | | | | | |
| Digitization | [bit] | 10 | | | |
| Supported bit resolutions | [bit/pixel] | 8, 10 | | | |
| Exposure time (EXP) | | 26μs to 1s (*1) | | | |
| Variable Gain Range (VGA) | [dB] | 8.4 | | | |
| Refresh rate (MRR) | [fps] | 90 | | | |
| Supported standard readout modes | | Binning/skipping | pixels | fps | Bit/px |
| 0 | | 1x1 | 2048 × 2048 | 90 | 8 |
| 1 | | 1x1 | 2048 × 2048 | 45 | 10 |
| Power consumption | | | | | |
| typical | [W] | 1.5 | | | |
| Maximum | [W] | 1.75 | | | |
| Mechanical | | | | | |
| height | [mm] | 26.4 | | | |
| width | [mm] | 26.4 | | | |
| depth | [mm] | 30.25 (with C/CS Mount module B) 25.2 (without C/CS Mount module B) | | | |
| weight | [g] | 32.1 (with C/CS Mount module B) 28.1 (without C/CS Mount module B) 8 (board level camera) | | | |

table 3-17, MQ042xG-CM, sensor and camera parameters

Notes:

- (*1) defined for max. bandwidth and 8bit per pixel. Higher dynamic range (i.e. 10 bit/pixel) will reduce the available frame rate. By decreasing bandwidth the minimal exposure time and exposure step will increase.

3.5.6.2. Quantum efficiency curves [%]

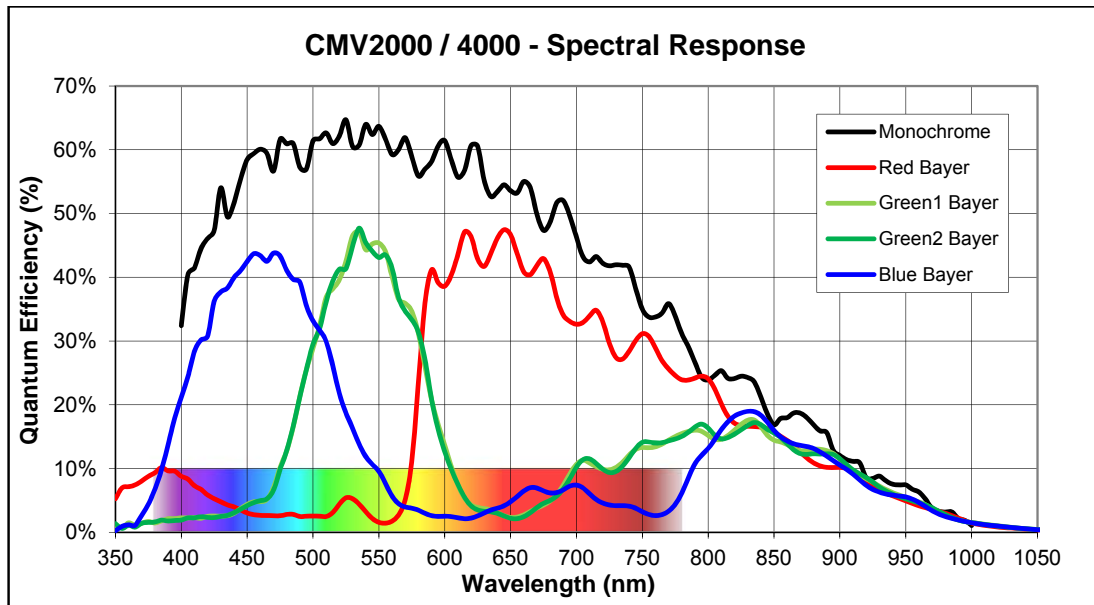


figure 3-24, CMV4000 mono and color, quantum efficiency curve, ©CMOSIS

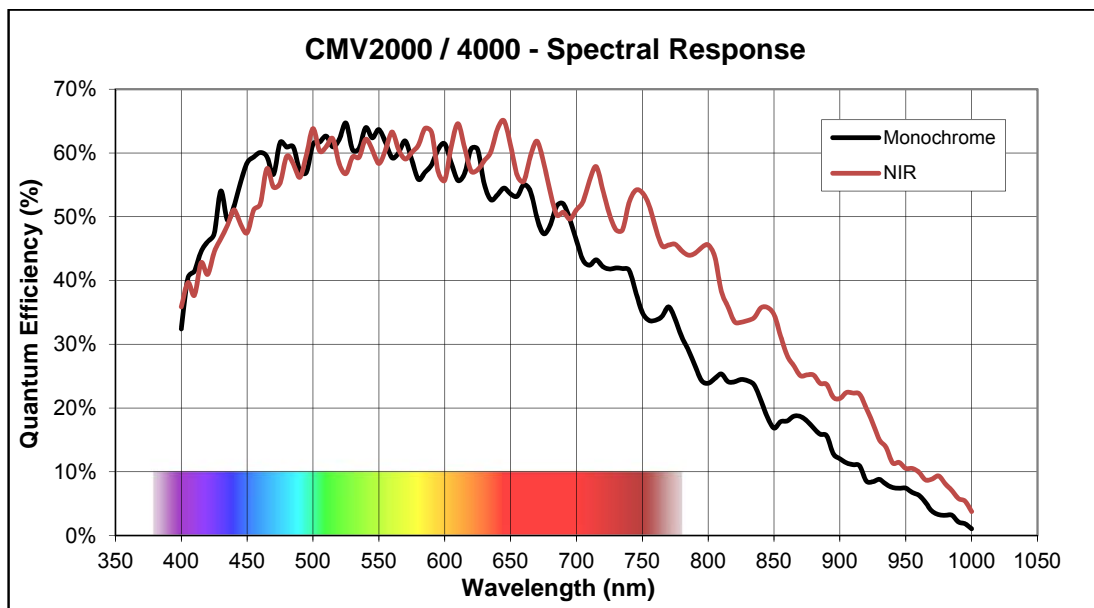


figure 3-25, CMV4000-mono and NIR (E12), quantum efficiency curves, ©CMOSIS

3.5.6.3. Mechanical drawings (C-mount [with C/CS mount module B])

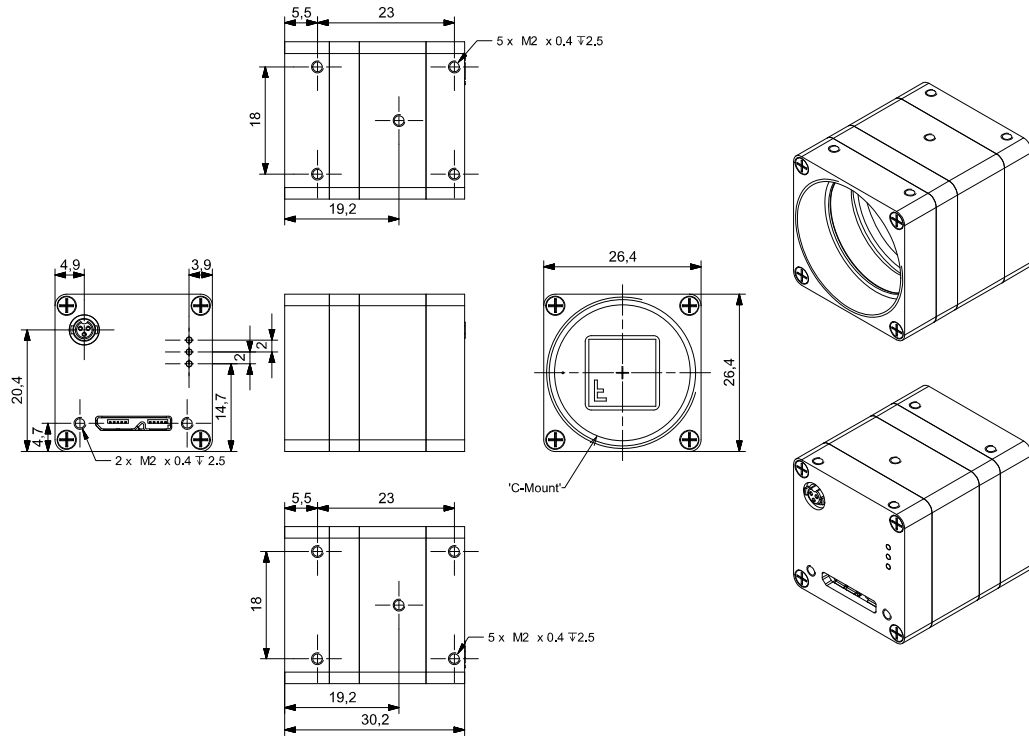


figure 3-26, mechanical drawing MQ042xG-CM, C-Mount housing

3.5.6.4. Mechanical drawings (CS-mount [without C/CS mount module B])

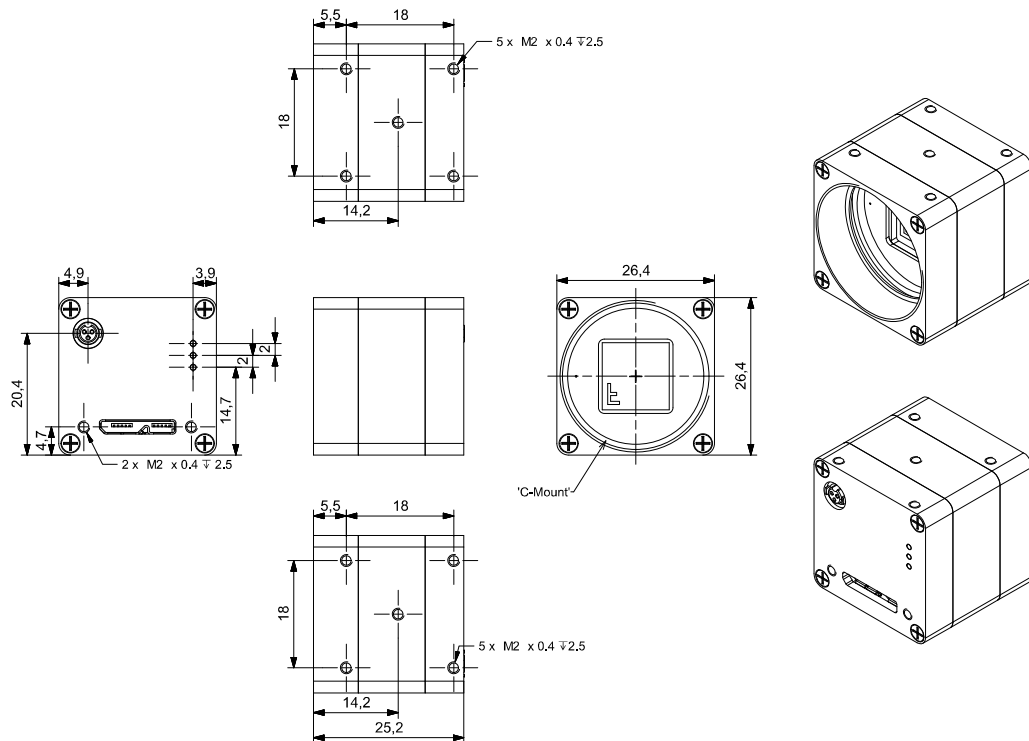


figure 3-27, mechanical drawing MQ042xG-CS, CS-Mount housing

3.5.6.5. Referenced documents

CMOSIS Datasheet CMV4000-datasheet-v3.2 (30/07/12)

3.5.6.6. Sensor features

| feature | Note |
|------------|--|
| Binning | No |
| Skipping | Not supported, yet |
| ROI | Single window in y direction supported, cropping in X supported by xiAPI (x coordinates multiple of 16, y coordinates multiple of 2) |
| HW Trigger | Trigger with overlap usable (see 4.3.2.4 Triggered mode with overlap) |
| HDR | Knee point based HDR (beta stage), see 4.4.9 HDR |

table 3-18, sensor features available

3.5.6.7. Frame rate examples

Following table lists examples for the maximum frame rate - Frames Per Second (FPS) that can be achieved with active region of interest (ROI), free run mode (no trigger), RAW8 data format, exposure time 200µs.

Tested with: Intel i7-3770, 4GB DDR3, GA-Z77M-D3H, Windows 7 x64, API_INST_V3_19_06. Measured without further data processing.

| Camera model | USB3-Controller | FPS | ROI |
|--------------|---------------------|-----|------------|
| MQ042MG-CM | Intel Z77 | 970 | 2048 x 180 |
| MQ042MG-CM | Fresco Logic FL1009 | 500 | 2048 x 300 |

Table 3-19, MQ042MG-CM, frame rate examples with ROI

For Machine Vision

C 1 6 1 4 — M

1 6 m m 1 : 1 . 4

(K P S P E C .)

PENTAX Precision Co.,Ltd.

| | | | | | | | |
|---|---|---|----|----------------------------|---------|---------------------------------------|----------------------|
| 1. Model | | C 1 6 1 4 - M | | | | | |
| 2. Application | | For Machine Vision 2/3 Format Mega-pixel Camera | | | | | |
| 3. Specification | | | | | | | |
| 3-1. Physical (As per the attached drawing) | | | | | | | |
| (1) Dimensions | ϕ 29.5 mm \times 33.2 mm | | | | | | |
| (2) Weight | 63 g | | | | | | |
| (3) Mount | C-Mount (1 – 32 UN – 2A) | | | | | | |
| (4) Filter Screw Size | ϕ 27 mm , P = 0.5 mm | | | | | | |
| 3-2. Optical | | | | | | | |
| (1) Focal Length | 16 mm \pm 5% | | | | | | |
| (2) Max. Aperture Ratio | 1 : 1.4 | | | | | | |
| (3) Iris Range | F / 1.4 to F / 16 | | | | | | |
| (4) Angle of View | Diagonal | | | | | | 38.28° |
| | Horizontal | | | | | | 30.97° |
| | Vertical | | | | | | 23.41° |
| (5) Picture format | 8.8 mm \times 6.6 mm | | | | | | |
| (6) Focusing Range | Inf. to 0.25m | | | | | | |
| (7) Back Focal Length | 14.61 mm | | | | | | |
| (8) Flange Back Length | 17.526 mm \pm 0.05 mm | | | | | | |
| 3-3. Mechanical | | | | | | | |
| (1) Focusing Mechanism | Straight Helicoid | | | | | | |
| | Rotation Angle | | | | | | 154.3° |
| | Rotation Torque | | | | | | 0.2 N·cm to 7.0 N·cm |
| | Focus Ring can be fixed at any positions by 3 fixing screws ① | | | | | | |
| | (refer to external view) | | | | | | |
| (2) Iris Mechanism | Non-click | | | | | | |
| | Rotation Angle | | | | | | 89.3° |
| | Rotation Torque | | | | | | 0.5 N·cm to 7.0 N·cm |
| | Iris Ring can be fixed at any positions by 3 fixing screws ② | | | | | | |
| | (refer to external view) | | | | | | |
| | | | | Approved | Checked | Drawn | Drawing Title |
| | | | | | | | SPEC. SEET |
| | | | | | | | |
| No. | Revisions | Date | By | | | | |
| PENTAX Precision Co.,Ltd. | | | | Data Drawn JUL. 11, '03 | | Drawing Number 31634-X001-00KP-B13 | |

3-4. Vibration & Shock Test Standard

(1) Vibration Conditions

| | |
|-----------------------|--|
| Wave | Sine Wave |
| Acceleration | 1.96 m/s ² to 59.78 m/s ² |
| Cycle Range | 10 Hz to 55 Hz |
| Cycle Period | 3 Minutes |
| Duration of Vibration | 120 Minutes Respectively in Three Dimensional Directions |

(2) Shock Conditions

| | |
|------------------------------|---|
| Tester | Shock Testing Machine by Dropping |
| Impact Force | 588 m/s ² |
| Duration of Shock | 3.5 ms |
| Directions & Number of Times | 1 Time Respectively in Three Dimensional Directions |

3-5. Environmental Temperature Range -20°C to $+50^{\circ}\text{C}$

4. Accessories

- | | |
|--|------------------------------|
| (1) Front Lens Cap | 1 piece |
| (2) Rear Lens Cap | 1 piece |
| (3) Fixing Screw for Focus Ring (Thumbscrew M1.4) | 1 piece (For Optional Usage) |
| (4) Fixing Screw for Iris Ring (Thumbscrew M1.4) | 1 piece (For Optional Usage) |
| (5) Packing Box | 1 piece |

| | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|------|----|----------------------------|---------|---------------------------------------|---------------|
| | | | | Approved | Checked | Drawn | Drawing Title |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | SPEC. SEET |
| No. | Revisions | Date | By | | | | |
| PENTAX Precision Co.,Ltd. | | | | Data Drawn JUL. 11, '03 | | Drawing Number 31634-X001-00KP-B23 | |

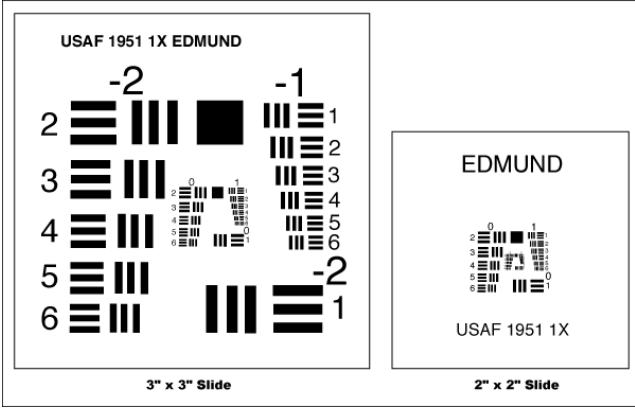
3" x 3" Positiv, USAF Auflösungstestbild



Artikelnr. #36-275

€196.00

1 - 5 for €196.00 each.
6 - 10 for €176.40 each.



Verfügbarkeit: LAGERND

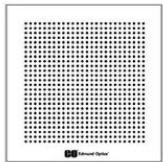
Spezifikationen

| | |
|---------------------|---|
| Typ | Positive Target |
| Größe (Inch) | 3 x 3 |
| Dicke (mm) | 1.5 |
| Auflösung | Minimum: Group -2, Element 1 Maximum: Group 7, Element 6 |
| Ebenheit (mm) | ≤0.00254 |
| Oberflächenqualität | 20-10 |
| Kanten | Beveled |
| Substrat | Float Glass |
| Optische Dichte OD | ≥3.0 |
| Beschichtung | Vacuum-Deposited Durable Chromium |
| RoHS | C |

Technische Informationen

| Number of Line Pairs / mm in USAF Resolving Power Test Target 1951 | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------------------|-------|
| Element | Group Number | | | | | | | | | | For High Res only | |
| | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.250 | 0.500 | 1.00 | 2.00 | 4.00 | 8.00 | 16.00 | 32.0 | 64.0 | 128.0 | 256.0 | 512.0 |
| 2 | 0.280 | 0.561 | 1.12 | 2.24 | 4.49 | 8.98 | 17.95 | 36.0 | 71.8 | 144.0 | 287.0 | 575.0 |
| 3 | 0.315 | 0.630 | 1.26 | 2.52 | 5.04 | 10.10 | 20.16 | 40.3 | 80.6 | 161.0 | 323.0 | 645.0 |
| 4 | 0.353 | 0.707 | 1.41 | 2.83 | 5.66 | 11.30 | 22.62 | 45.3 | 90.5 | 181.0 | 362.0 | — |
| 5 | 0.397 | 0.793 | 1.59 | 3.17 | 6.35 | 12.70 | 25.39 | 50.8 | 102.0 | 203.0 | 406.0 | — |
| 6 | 0.445 | 0.891 | 1.78 | 3.56 | 7.13 | 14.30 | 28.50 | 57.0 | 114.0 | 228.0 | 456.0 | — |

50 x 50mm, 0.5mm Spacing, Glass Distortion Target



Artikelnr. #58-536

Verfügbarkeit: LAGERND

€509.60

1 - 5 for €509.60 each.
6 - 10 for €458.64 each.

Spezifikationen

| | |
|--------------------------------|---|
| Typ | Chrome on Glass |
| Größe (Inch) | 3 x 3 |
| Mustergröße (mm) | 50 x 50 |
| Dicke (mm) | 1.5 |
| Punktdurchmesser (mm) | 0.250 |
| Toleranz Punktdurchmesser (mm) | ±0.002 |
| Punktabstand (mm) | 0.500 |
| Toleranz Punktabstand (mm) | ± 0.001 Center to Center, ± 0.001 Grid Corner to Corner |
| Gesamtgenauigkeit (mm) | ±0.001 |
| Oberflächenebenheit | 4 - 6λ |
| Oberflächenqualität | 40-20 |
| Substrat | Soda Lime Float Glass |
| Optische Dichte OD | >3.0 |
| Beschichtung | Reflective First Surface Chromium Rabs = 50% ±5% @ 550nm |
| RoHS | C |

C Messdaten der Versuche, weitere Datenblätter und Aufbau in CATIA

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich gemäß der Rahmenprüfungsordnung der Hochschule München, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Entwicklung eines Prüf- und Messstandes für die Kalibrierung optischer Systeme

selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ort, Datum

Unterschrift